

DASAR-DASAR PENELITIAN IKLIM MIKRO EKOSISTEM HUTAN

DR. CHRISTOPHIL MEDELLU, SU

JURUSAN PENDIDIKAN FISIKA FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU
PENGETAHUAN ALAM UNIVERSITAS NEGERI MANADO



ISBN: 978-602-9200-18-8



PENERBIT

Dasar-Dasar Penelitian Iklim Mikro Ekosistem Hutan

**KELOMPOK KONSENTRASI FISIKA LINGKUNGAN
UNIMA**

i

DASAR-DASAR PENELITIAN IKLIM MIKRO EKOSISTEM HUTAN

DR. CHRISTOPHIL MEDELLU, SU

**JURUSAN PENDIDIKAN FISIKA FAKULTAS MATEMATIKA
DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM UNIVERSITAS NEGERI
MANADO**



**PENERBIT
KELOMPOK KONSENTRASI FISIKA LINGKUNGAN
UNIMA**

DASAR-DASAR PENELITIAN IKLIM MIKRO EKOSISTEM HUTAN

Penulis:

DR. CHRISTOPHIL MEDELLU, SU

Penyunting:

Prof. DR. R. N. Palilingan, MS

Hak Cipta ©2013 pada penulis, dilarang keras mengutip, menjiplak, memfotokopi baik sebagian atau keseluruhan dari isi buku ini tanpa mendapat izin tertulis dari pengarang atau penerbit.

Diterbitkan pertama kali oleh Penerbit Kelompok Konsentrasi Fisika Lingkungan UNIMA, Tondano 2012.



ISBN: 978-602-9200-18-8

Dicetak oleh Kelompok Konsentrasi Fisika Lingkungan UNIMA Tahun 2012.

Dicetak ulang oleh Kelompok Konsentrasi Fisika Lingkungan Tahun 2013.

DAFTAR ISI

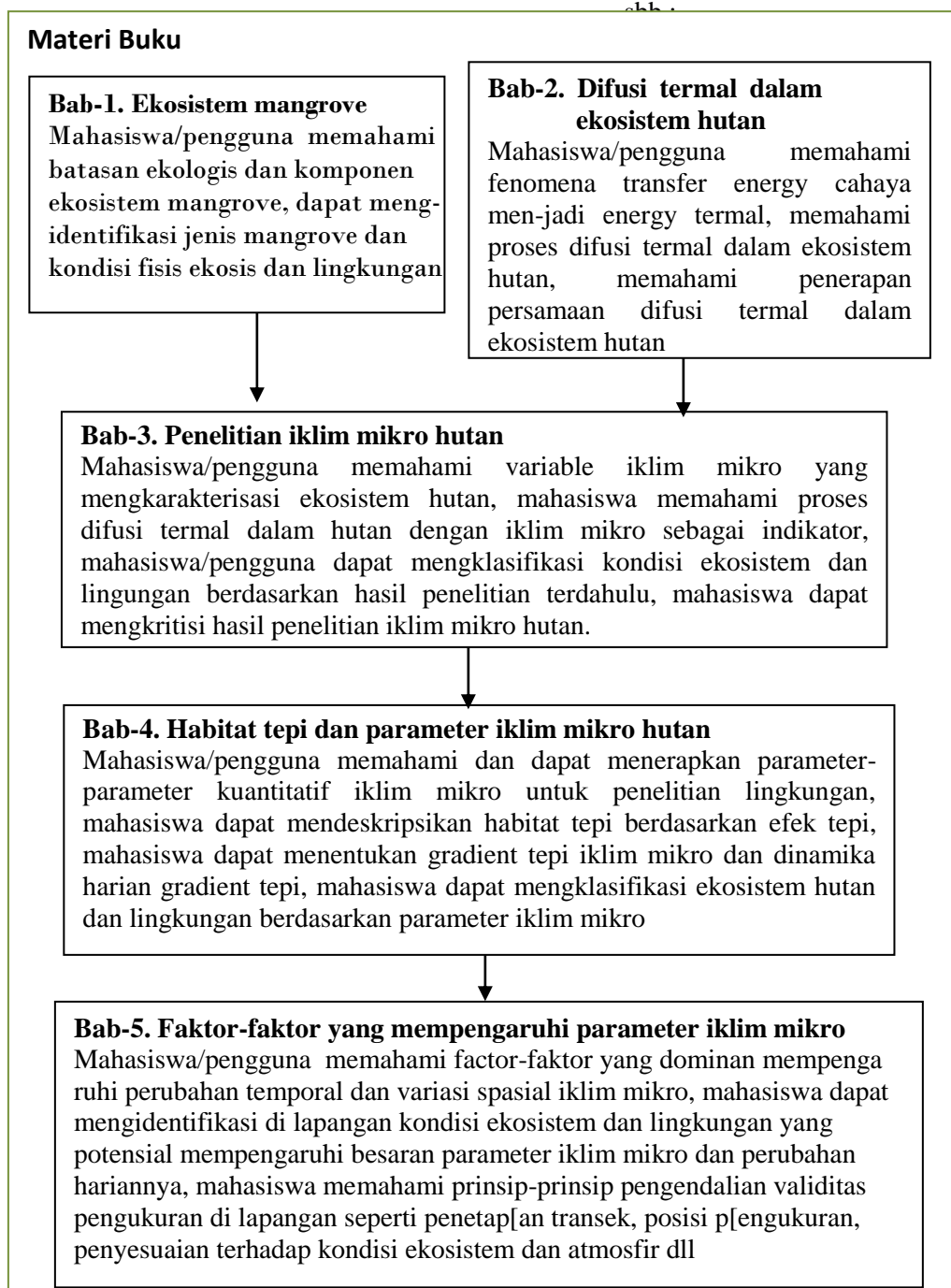
DAFTAR ISI.....	i
KATA PENGANTAR.....	ii
PETA KOMPETENSI.....	iii
1. HUTAN MANGROVE DAN EKOSISTEM MANGROVE	1
1.1. Definisi Hutan Mangrove	2
1.2. Ekosistem Mangrove	4
1.3. Jenis dan Fungsi/Kemanfaatan Hutan Mangrove.....	23
1.4. Bahan Instruksional	44
2. DIFUSI TERMAL DALAM EKOSISTEM HUTAN	62
2.1. Radiasi Matahari dan Emisi Termal	63
2.2. Difusi Termal dalam Ekosistem Hutan	76
3. PENELITIAN IKLIM MIKRO HUTAN DAN HUTAN MANGROVE.....	104
3.1. Definisi Iklim Mikro dan Karakteristik Iklim Mikro Hutan.....	105
3.2. Skema Perubahan Iklim Mikro Harian dalam Hutan dan Hutan Mangrove.	107
3.3. Pentingnya Karakterisasi Iklim Mikro Ekosistem Hutan.....	111
3.4. Variabel-variabel Iklim Mikro untuk Karakterisasi Ekosistem Hutan.....	129
4. HABITAT TEPI DAN PARAMETER IKLIM MIKRO.....	132
4.1. Habitat Tepi.....	133
4.2. Parameter Iklim Mikro untuk Karakterisasi Ekosistem Hutan.....	136
5. FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI PARAMETER IKLIM MIKRO	160
5.1. Faktor-Faktor yang mempengaruhi parameter iklim mikro dalam hutan	161
5.2. Faktor-Faktor yang mempengaruhi parameter iklim mikro hutan mangrove.....	167
DAFTAR PUSTAKA	171

KATA PENGANTAR

Buku Dasar-dasar Penelitian Iklim Mikro dalam Hutan Mangrove ini disusun sebagai referensi kegiatan penelitian lapangan bidang Fisika Lingkungan bagi Mahasiswa Jurusan Fisika, meliputi program studi: Pendidikan Fisika, dan Ilmu Fisika. Buku ini merupakan bagian pertama dari buku: Pengembangan Penelitian Iklim Mikro Hutan dan Hutan Mangrove. Bagian kedua membahas secara khusus metode penelitian berbasis pemodelan matematik. Buku ini terdiri dari lima bab. Bab satu mengarahkan mahasiswa atau pengguna dalam memahami ekosistem hutan mangrove, mengidentifikasi struktur, komponen ekosistem mangrove, dan berbagai variasi lingkungan yang berinteraksi langsung dengan ekosistem mangrove. Bab dua membahas konsep fisis difusi termal antara ekosistem mangrove dengan lingkungan berbatasan. Bab tiga membahas iklim mikro mangrove, variasi kondisi iklim mikro karena perbedaan struktur hutan dan lingkungan, dan pengukuran variable- variable iklim mikro untuk mngkarakterisasi ekosistem dan interaksninya dengan lingkungan berbatasan. Bab empat membahas parameter-parameter iklim mikro sebagai indicator ekosistem mangrove dan interksinya dengan lingkungan berbatasan dan perubahan ekosistem maupun lingkungan. Bab lima membahas factor-faktor yang mempengaruhi besaran dan perubahan besaran parameter iklim mikro sebagai acuan bagi mahasiswa atau pengguna dalam menginterpretasi hasil pengukuran, analisis dan pemodelan data iklim mikro hutan mangrove.

PETA KOMPETENSI

Peta kompetensi mahasiswa atau pengguna menurut bagian-bagian buku adalah



1. HUTAN MANGROVE DAN EKOSISTEM MANGROVE



1.1. Definisi Hutan Mangrove

Hutan mangrove adalah tipe hutan yang tumbuh di daerah pasang surut (terutama di pantai yang terlindung, laguna dan muara sungai) yang tergenang saat pasang dan bebas dari genangan saat surut. Hutan mangrove banyak ditemui di sepanjang pantai di Indonesia. Hutan mangrove didefinisikan sebagai pepohonan atau belukar yang tumbuh di daerah pasut dari estuaria, delta atau laguna di wilayah tropis atau sub-tropis hingga lintang 30° dari equator (Rosenberg *et al.*, 1985; Monteith, 1975).

Berger *et al.* (2008), mengutip Lugo (1980) dan Ball (1960) menyatakan bahwa mangrove adalah jenis hutan yang bertumbuh di daerah beriklim tropis dan sub tropis yang dikarakterisasi oleh adanya aliran air segar, kondisi substrat bertingkat, tergenangi air laut dalam periode dan jangka waktu, kondisi salinitas dan terjadi akumulasi racun. Aksornkoe (1993), mengemukakan bahwa hutan mangrove adalah tumbuhan halofit yang hidup di sepanjang pantai tropis dan sub tropis, pada daerah yang dipengaruhi pasang surut.

Wolanski (2008) mengemukakan: mangrove didefinisikan sebagai sekumpulan pohon dan belukar yang bertumbuh di daerah pasut dari muara atau delta atau laguna di wilayah tropis/sub tropis, paling jauh hingga lintang 30°. Menurut Nybakken (1992), hutan mangrove adalah varietas komunitas pantai tropik yang didominasi oleh beberapa species pohon atau semak-semak yang khas karena dapat tumbuh pada perairan asin. Kathiresan dan Bingham (2001) mendefinisikan mangrove sebagai pohon yang bertumbuh di batas daratan dengan laut pada daerah tropis dan sub tropis. Istilah —*mangrove*” dapat diartikan sebagai pohon atau komunitas hutan. Duke (1992) mendefinisikan mangrove sebagai pohon, belukar, palma atau pakis tanah yang tingginya melebihi satu setengah meter yang bertumbuh di zona pasang surut (intertidal zone). Para ahli berpendapat bahwa definisi ini dapat diterima apabila pakis tanah dikelompokkan sebagai mangrove asosiasi (*mangrove associates*) dan bukan mangrove sesungguhnya (*true mangrove*)

Kathiresan dan Bingham (2001) mengutip Macnae (1968) mengemukakan penggunaan nama *mangal* yang diartikan sebagai hutan, dan membedakannya dengan *mangrove* yang diartikan sebagai species pohon (individual). Hutan

mangrove sering dinyatakan dengan istilah *tidal forest*, *coastal woodlands*, atau *oceanic rain forests* (Kathiresan dan Bingham, 2001). Dalam buku ini secara umum digunakan istilah mangrove yang diartikan sebagai komunitas hutan mangrove.

Pemandangan umum pantai yang ditumbuhi hutan mangrove disajikan pada Gambar-1.1. dan Gambar-1.2. Gambar-1.1 menunjukkan hamparan hutan mangrove yang berhadapan dengan laut terbuka. Pantai yang terletak di bagian belakang memiliki kemiringan antara 30 derajat sampai 40 derajat dan ditumbuhi berbagai pepohonan dan belukar. Area hutan mangrove dimanfaatkan untuk budidaya teripang laut.



Gambar-1.1. Pemandangan umum pantai yang ditumbuhi hutan mangrove (foto dari arah laut ke pantai). Lokasi Teluk Talengen, Kabupaten Sangihe

Lebar hamparan hutan mangrove bervariasi, ada yang sempit tapi ada yang sangat lebar. Di pantai yang terjal hutan mangrove relative sempit sedangkan di muara sungai yang datar dan teluk yang dangkal, lebarnya dapat mencapai 18 km, misal di Sungai Sembilang, Sumatra Selatan (Soemodihardjo *et al.*, 1996). Gambar-1.1 dan Gambar-1.2 menyajikan hamparan hutan mangrove yang berbeda lebarnya. Lebar hutan mangrove di teluk Talengen (Gambar-1.1)

bervariasi antara 80 meter hingga 110 meter, sedangkan di desa Arakan mencapai 420 meter



Gambar-1.2. Pandangan dari atas, hamparan mangrove di desa Wawontulap, Kabupaten Minahasa Selatan (diambil dari google earth, tanggal 11 Agustus 2011)

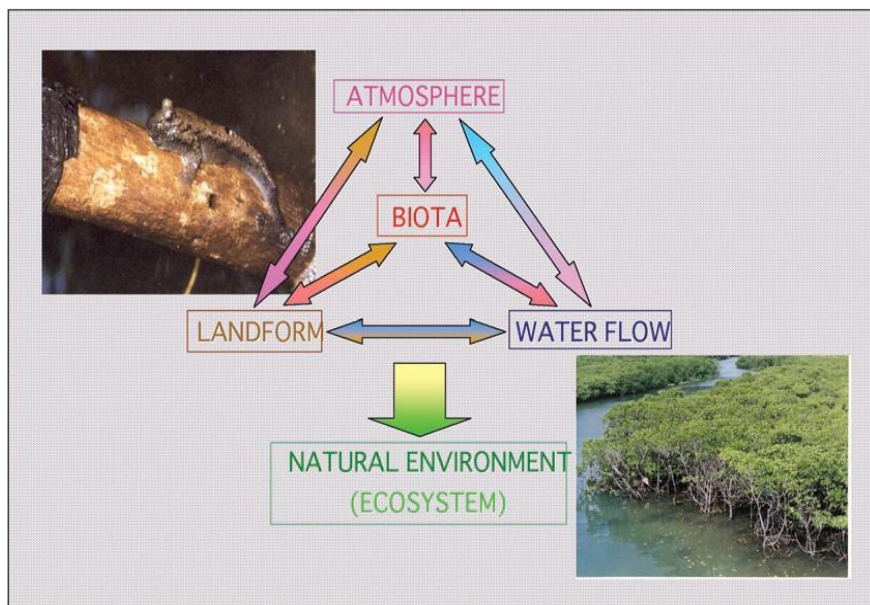
Kurva berwarna kuning pada Gambar-1.2 menunjukkan batas mangrove dengan pantai. Perbedaan lebar hutan mangrove ini terutama ditentukan oleh perbedaan topografi tanah dimana hutan mangrove bertumbuh. Topografi pantai di desa Arakan hanya bervariasi antara 2 derajat hingga 8 derajat, sedangkan di Teluk Talengen bervariasi antara 30 derajat sampai 40 derajat. Walaupun kurang lebar, hutan mangrove di teluk Talengen berfungsi baik untuk mereduksi pengaruh ombak dan arus pasang-surut, bertumbuh lebat, dapat bertahan dengan proses suksesi alamiah yang sangat baik.

1.2. Ekosistem Mangrove

Kusmana (2009) mengemukakan bahwa ekosistem mangrove merupakan ekosistem *interface* antara ekosistem daratan dengan ekosistem lautan. Ekosistem ini mempunyai fungsi spesifik yang keberkelangsuannya bergantung pada dinamika yang terjadi di ekosistem daratan dan lautan.

Menurut Santoso (2000), ekosistem mangrove adalah suatu sistem di alam tempat berlangsungnya kehidupan yang mencerminkan hubungan timbal balik antara makhluk hidup dengan lingkungannya dan diantara makhluk hidup itu sendiri, terdapat pada wilayah pesisir, terpengaruh pasang surut air laut, dan didominasi oleh spesies pohon atau semak yang khas dan mampu tumbuh dalam perairan asin/payau.

Sebagaimana ekosistem pada umumnya, ekosistem mangrove meliputi komponen biotik dan abiotik yang berinteraksi satu sama lain. Komponen abiotik meliputi atmosfer, bentang lahan, dan aliran air laut dan air segar dari daratan, termasuk banjir yang disebabkan oleh hujan. Komponen biotik meliputi tumbuhan yakni pohon mangrove dan tumbuhan lain yang berada di sekiranya dan berinteraksi dengan hutan mangrove, hewan-hewan dan microorganism yang hidup dalam hutan mangrove. Seluruh komponen berinteraksi satu sama lain dan membentuk ekosistem alamiah hutan mangrove. Manusia juga menjadi komponen biotik dari hutan mangrove yang dapat berperan meningkatkan kualitas dan kapasaitas sumberdaya hutan mangrove tapi dapat pula menyebabkan degradasi bahkan kerusakan ekosistem mangrove.



Gambar-1.3. Skema ekosistem (umpan-balik antar komponen) mangrove (sumber: Mazda *et al.*, 2007)

Mazda *et al.* (2007) menggambarkan secara skematik komponen ekosistem dan interaksi antar komponen ekosistem mangrove (Gambar-1.3). Gambar-1.3 memperlihatkan komponen-komponen ekosistem hutan mangrove yang berinteraksi satu sama lain. Fitur ekosistem dan perubahannya merupakan hasil interaksi komponen atmosfer, bentuk lahan, aliran air dan biota. Kehidupan biota dalam hutan mangrove bergantung pada (1) kondisi atmosfer seperti intensitas penyinaran, suhu udara, kelembaban udara, kecepatan angin, curah hujan, (2) aliran air laut dan air segar dengan kandungan nutrient dan salinitas tertentu, (3) bentuk lahan termasuk proses-proses pada tanah bagian atas (top soil) seperti pelapukan dll. Berger *et al.* (2008) mengemukakan bahwa ekosistem mangrove dinilai rawan terhadap perubahan iklim. Secara ekologi, ekosistem mangrove sangat kompleks karena interaksi kekuatan geofisis pasut, limpasan permukaan, penurunan air tanah dan sungai, gelombang dan sedimen-sedimen yang membentuknya, nutrient dan air asin.

Skema ekosistem mangrove di atas menunjukkan bahwa perubahan system dan ekosistem mangrove secara langsung akan mempengaruhi factor-faktor abiotik seperti suhu, cahaya dan pasokan nutrient, dan juga factor-faktor biotik seperti produktivitas atau komposisi species (Granek and Ruttenberg, 2008).

a. Bentang alam hutan mangrove

Bentang lahan mangrove memiliki karakteristik khusus yang berbeda dengan hutan di daratan. Wilayah mangrove dikendalikan oleh proses fisis daratan, aliran sungai serta aktivitas ombak pasut. Keberadaan dan kekuatan pengaruh tersebut serta factor topografi dan iklim dan menentukan pertumbuhan pohon mangrove dan pohon/hutan lain di sekitar hutan mangrove. Berdasarkan bentang alam, para ahli/peneliti merumuskan klasifikasi tipe hutan mangrove atau ekotipe hutan mangrove. Lugo and Snedaker (1974) yang dikutip Kathiresan (2004) mengklasifikasikan hutan mangrove atas enam tipe yakni:

- 1) ***Overwash mangrove forests***: adalah pulau kecil yang terbentuk dari mangrove (small mangrove islands), yang selalu mengalami pencucian material oleh pasut
- 2) ***Fringing mangrove forests***: adalah tipe mangrove yang bertumbuh sepanjang garis opantai yang terlindungi yang dipengaruhi oleh pasut

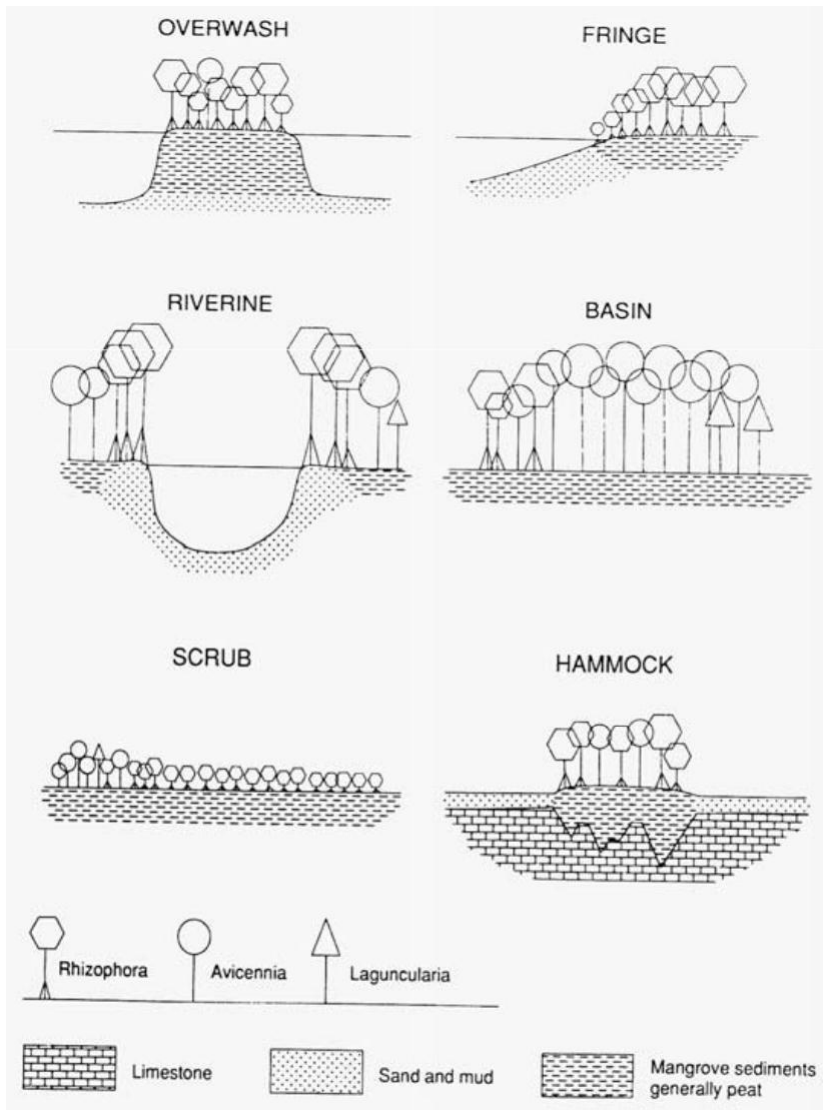
harian. Tipe mangrove ini peka terhadap erosi oleh turbulensi gelombang dan pasut.

- 3) ***Riverine mangrove forests***: adalah tipe hutan mangrove yang bertumbuh sepanjang tepi alur sungai yang setiap hari terganggu pasut. Tipe mangrove ini mendapat suplai nutrient menyebabkan system pepohonannya produktif dan tinggi
- 4) ***Basin mangrove forests***: adalah tipe mangrove yang berada sepanjang tepi hamparan lumpur bagian dalam dan pada cekungan drainase. Letaknya pada saluran limpasan dari daratan ke arah laut, dengan kecepatan aliran air yang rendah.
- 5) ***Hammock mangrove forests***: Tipe mangrove ini mirip dengan tipe basin tapi terletak lebih tinggi dari keempat tipe mangrove tersebut di atas.
- 6) ***Scrub mangrove forests***: adalah mangrove berukuran kerdil (dwarf mangrove) yang bertumbuh sepanjang tepi pantai.

Secara skematis, klasifikasi ekotipe mangrove yang dikemukakan oleh Lugo dan Snedaker disajikan pada Gambar-1.4. Gambar-1.4 menyajikan penampang (bersifat umum) dari enam tipe mangrove, dengan material substrat dan jenis hutan mangrove yang umum ditemui. Secara skematis, ekotipe hutan mangrove menurut Lugo and Snedaker (1974) yang dikutip Kathiresan (2004), disajikan pada Gambar-1.4. Hutan mangrove tipe *overwash* berbentuk pulau kecil yang keseluruhannya terbentuk dari hamparan hutan mangrove. Lahan di bawah hutan mangrove terbentuk dari proses sedimentasi oleh akar mangrove. Sedimen ini selalu —dicucil oleh ombak dan pasang surut. Tipe *overwash* ini dari jenis *Rhizophora*. Substrat lapisan atas merupakan material sedimentasi, sedangkan pada lapisan bawah materialnya berupa pasir dan lumpur atau campuran pasir dan lumpur. Tinggi tegakan tidak memiliki pola yang jelas antara pohon yang tinggi dengan yang rendah.

Tipe ini berbatasan sebelah luar dengan laut yang relative tenang seperti dalam teluk atau laguna, dan sebelah dalam dengan pantai. Jenis mangrove pada tipe *fringe* umumnya adalah dari jenis *Rhizophora*. Bagian dasar substrat didominasi lumpur kemudian di atasnya tersusun material sedimentasi. Struktur pohon biasanya lebih rendah pada bagian depan (berbatasan dengan laut) dan lebih tinggi pada bagian belakang. Kerapatan

pohon dan tutupan kanopi sangat tinggi, sehingga penetrasi sinar matahari tergolong rendah.



Gambar-1.4 Sketsa ekotipe mangrove menurut Lugo and Snedaker (1974) (dikutip dari Kathiresan , 2004).

Tipe *riverine* berkembang sepanjang tepi alur sungai. Substratnya biasanya berupa lumpur tebal. Di beberapa tempat yang kandungan tanah dalam limpasan rendah, substrat mangrove terdiri dari lumpur bercampur pasir. Mangrove yang bertumbuh sepanjang aliran sungai biasanya terdiri dari beberapa jenis. Bagian tepi alur sungai biasanya ditumbuhi jenis *Rhizophora* yang lebarnya bergantung pada lebarnya hamparan dari tepi alur sungai dan ketebalan lumpur. Di bekalang *Rhizophora* biasanya ditumbuhi *Avicennia*. Semakin jauh dari tepi alur sungai dan semakin berkurangnya lumpur tumbuh beberapa jenis mangrove seperti *Bruguiera*, *Sonneratia*. Lebar hutan mangrove pada area ini bergantung pada topografi dasar sungai. Semakin datar topografi sungai semakin panjang alur sungai di zona pasut dan berarti semakin lebar hamparan hutan mangrove.

Tipe *basin* biasanya terdiri dari berbagai jenis mangrove, yang tidak memiliki pola pertumbuhan yang jelas. Mangrove dari jenis berbeda bertumbuh bercampur dengan jenis yang lain. Kerapatan kanopi mangrove biasanya rendah disbanding tipe *fringe*. Substrat pohon mangrove, terbentuk dari hasil sedimentasi dan pelapukan material seperti dedaunan dan material yang diangkut oleh ombak dan pasut.

Tipe *scrub* biasanya terdiri dari beberapa jenis mangrove, namun berukuran kecil disbanding mangrove dengan jenis yang sama yang bertumbuh pada kondisi ekologis tipe *fringe* dan *riverine*. Tipe *scrub* ini adalah mangrove yang kurang subur karena kurang mendapat suplai nutrient dari aliran air segar atau aktivitas pasut. Disini aktivitas pasut lebih rendah disbanding tipe *fringe* dan *riverine*, dan suplai sedimennya rendah karena kecepatan aliran air laut rendah. Material yang dibawa air laut (pasut) sudah diendapkan pada perakaran hutan mangrove yang terletak lebih depan (ke arah laut). Substratnya hanya terbentuk dari material seperti dedaunan dan batang pohon yang mengalami pelapukan dan karena aktivitas mikroorganisme dalam tanah.

Tipe *hammock* biasanya didominasi jenis *Rhizophora*, asalkan substratnya masih mengandung banyak lumpur. Waktu dan frekwensi genangan banjir lebih rendah disbanding tipe lain seperti *fringe forest*. Posisi mangrove yang bertumbuh pada tipe ekologi hammock lebih tinggi dari tipe mangrove lainnya. Lapisan substrat paling bawah biasanya terbentuk dari lempung,

kemudian campuran pasir dan lumpur berbaur dengan material desimentasi dan hasil proses pelapukan dan penghancuran oleh mikroorganisme. Deskripsi ekotipe hutan mangrove di atas bersifat umum dan dapat saja terdapat variasi yang lebih spesifik, bergantung pada factor-faktor yang mengendalikan pertumbuhan mangrove serta material-material yang diendapkan di bawah perakaran mangrove. Contoh-contoh hutan mangrove menurut variasi tipenya disajikan pada Gambar-1.5 sampai dengan Gambar-1.9



Gambar-1.5a. Contoh tipe *fringe forest* yang homogen, ditumbuhi satu jenis mangrove (*Rhizophora*). Lokasi Teluk Talengen, Kabupaten Sangihe

Gambar-1.5a dan 1.5b adalah contoh tipe *fringe forest*. Kondisi mangrove sangat berbeda. Pohon mangrove di lokasi Teluk Talengen (Gambar-1.5a) bertumbuh sangat rapat dengan kerapatan tutupan kanopi sangat tinggi. Struktur kanopi rendah pada bagian depan dan bertambah ketinggiannya hingga jarak 20 m – 25 m.



Gambar-1.5b. Contoh tipe fringe forest didominasi jenis *Bruguiera*, substrat berpasir dan sedikit lumpur. Lokasi pantai Wori Kabupaten Minahasa Utara

Struktur kanopi ini merupakan respons pohon mangrove terhadap pengaruh penyinaran dan angin dari laut terbuka (Yoko-o and Tokeshi, 2011). Substratnya lumpur tebal dan bahan-bahan organik hasil pelapukan. Pohon mangrove di desa Wori bertumbuh dengan jarak renggang dan tutupan kanopinya rendah. Substratnya pasir dengan sedikit campuran lumpur. Kandungan nutrient dalam tanah rendah dibandingkan hutan mangrove di lokasi Teluk Talengen.

Gambar-1.6a dan 1.6b adalah contoh tipe riverine forest. Gambar-1.6a menunjukkan area hutan mangrove yang dimanfaatkan sebagai lokasi perumahan masyarakat. Substrat di tepi kiri dan kanan alur sungai terdiri dari lapisan lumpur bercampur sedikit pasir (paling) dan kerikil atas. Hutan mangrove ini memperoleh pasokan nutrient dari daratan yang dibawa air sungai dan dari bahan organik yang dibuang masyarakat sekitar. Bahan padatan atau cair yang dibuang masyarakat dapat berupa nutrient tapi dapat juga berupa toksik yang mengganggu pertumbuhan hutan mangrove dan kehidupan biota dalam hutan mangrove. Tipe *riverine forest* di desa Ratatotok Timur menunjukkan tipe kebanyakan *riverine forest*. Bagian tepi

alur sungai ditumbuhi jenis *Rhizophora* dan di bagian belakangnya ditumbuhi mangrove jenis yang lain. Substratnya berupa lumpur tebal.



Gambar-1.6a. Contoh tipe *riverine forest* ditumbuhi jenis *Rhizophora*, *Sonneratia*, dan *Bruguiera*. Lokasi Desa Basaan Kabupaten Minahasa Tenggara



Gambar-1.6b. Contoh tipe *riverine forest* ditumbuhi jenis *Rhizophora* di bagian depan, *Sonneratia*, dan *Bruguiera* di bagian belakang. Lokasi Desa Ratatotok Timur, Kabupaten Minahasa Tenggara

Tipe *basin* yang ditunjukkan dalam Gambar-1.7a dan 1.7b menunjukkan kondisi yang berbeda dalam hal jenis mangrove dan substrat.



Gambar-1.7a. Contoh tipe *basin* yang berbatasan dengan pantai, didominasi *Sonneratia Alba*. Lokasi desa Ratatotok Timur, Kabupaten Minahasa Tenggara



Gambar-1.7b. Contoh tipe *basin*, terdiri dari beberapa jenis mangrove. Lokasi desa Ratatotok Timur, Kabupaten Minahasa Tenggara

Gambar-1.7a adalah mangrove tipe *basin* yang didominasi *Sonneratia alba* yang memiliki akar nafas cukup rapat. Substratnya berpasir dengan sedikit

campuran lumpur. Tipe basin yang ditunjukkan dalam Gambar-1.7b ditumbuhi berbagai jenis mangrove seperti *Rhizophora*, *Bruguiera*, *Sonneratia*, dll. Substrat berupa lumpur dan material sedimentasi yang sebagiannya telah mengalami pelapukan. Kerapatan kanopi pada kedua lokasi hamper sama, dan tergolong rendah.

Gambar-1.8 memperlihatkan contoh tipe *scrub*, yang didominasi mangrove jenis *Sonneratia*. Tinggi tegakan mangrove di lokasi ini lebih rendah dan ukuran batang lebih kecil dibanding pohon mangrove yang bertumbuh agak ke tengah. Substratnya berupa lumpur bercampur material dedaunan dan bahan-bahan organic lainnya yang telah mengalami pelapukan



Gambar-1.8. Contoh tipe *scrub* (di bagian belakang ke arah laut) yang berbatasan dengan belukar pantai di bagian depan. Lokasi Desa Ratatotok Timur, Kabupaten Minahasa Tenggara

Mangrove tipe *hammock*, ditunjukkan dengan contoh pada Gambar-1.9a dan 1.9b. elevasi kedua lokasi ini lebih tinggi dari lokasi lainnya, dan hanya tergenang air pasang tinggi (*high tide*). Substratnya berupa lumpur bercampur bahan organic seperti dedaunan dan batang pohon yang sebagiannya sudah mengalami pelapukan. Proses pencucian substrat oleh air laut sangat rendah karena kecepatan air laut yang rendah pada saat terjadi genangan. Penanaman hutan mangrove oleh masyarakat membuktikan

bahwa pada lokasi seperti dapat di lakukan penanaman dan menghasilkan barisan hutan mangrove yang sangat lebat. Hutan mangrove yang ditanaman masyarakat dapat berfungsi mengendalikan erosi tepi jalan, memberikan kesejukan dan berbagai fungsi ekologis lainnya. Pilihan jenis hutan mangrove yang ditanam disesuaikan dengan kondisi substrat. Penanaman jenis *Rhizophora* berhasil baik karena di lokasi ini lumpurnya masih tebal. Substrat pada lokasi mangrove yang ditunjukkan dengan Gambar-1.9b berupa bahan organik bercampur sedikit lumpur, hasil pelapukan.



Gambar-1.9a. Contoh tipe *hammock* (bagian depan dengan lebar \pm 14 meter, terdapat *Rhizophora* yang ditanam masyarakat, dan bagian belakang terdiri dari beberapa jenis mangrove). Lokasi Desa Ratatotok Timur, Kabupaten Minahasa Tenggara

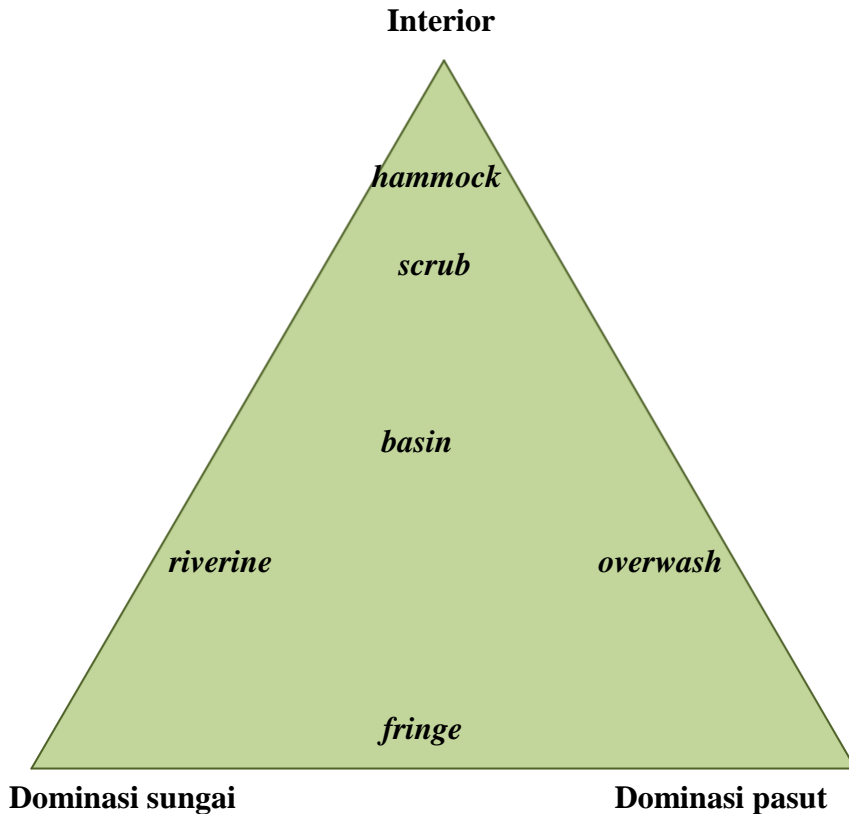


Gambar-1.9b. Contoh tipe *hammock*, terdiri dari beberapa jenis mangrove, termasuk mangrove asosiasi. Lokasi Desa Ratatotok Timur, Kabupaten Minahasa Tenggara

Klasifikasi ekotipe yang dikemukakan oleh Lugo dan Snedaker didasarkan pada bentang alam yang dikontrol oleh tiga komponen utama yakni: sungai, pasut dan kondisi interior hutan mangrove. Posisi masing-masing tipe berdasarkan dominasi tiga komponen utama, disajikan pada Gambar-1.10.

Tipe *fringe*, didominasi oleh pengaruh pasut dan sungai. Kondisi interior tidak signifikan pengaruhnya dan dapat berubah karena pengaruh aktivitas sungai dan pasut. Misalnya erosi atau pengendapan material oleh sungai dan pasut, menyebabkan perubahan bentang lahan (permukaan lahan) hutan mangrove.

Tipe *riverine*, didominasi oleh aktivitas sungai. Pengaruh kondisi interior dan pasut relative lemah. Pengaruh pasut misalnya direduksi oleh tanggul sungai, yang mengamburkan energy aliran pasut. Tipe *overwash* dipengaruhi oleh aktivitas pasut dan sedikit pengaruh kondisi interior. Aktivitas pasut dapat mengangkat material atau mengendapkan material di bawah perakaran mangrove dan dapat mengubah permukaan lahan. Kondisi interior sendiri misalnya kerapatan perakaran mangrove akan menentukan proses pengikisan permukaan lahan dan/atau pengendapan material.



Gambar-1.10. Tipe Ekologi Mangrove berdasarkan komponen fisik yang mempengaruhinya (Kathiresan, 2004)

Pembentukan lahan pada tipe *basin* di pengaruhi oleh sungai, pasut, dan kondisi interior hutan mangrove. Material lahan mangrove tipe basin didominasi material hasil sedimentasi dan penumpukan bahan di sekitar perakaran mangrove. Kecepatan aliran pasut relatif rendah sehingga pencucian permukaan lahan kurang intensif seperti pada tipe *fringe*. Pengaruh sungai juga tidak sekuat yang terjadi pada tipe *riverine*. Aliran air segar hanya merembes dari tanggul-tanggul alam.

Tipe *scrub* terutama dipengaruhi oleh kondisi interior dan sedikit aktivitas pasut. Aktivitas pasut relatif lemah sehingga sedimentasi dan pencucian permukaan lahan kurang intensif dibanding pada tipe *fringe*. Material yang pembentukan lahan terutama adalah hasil pelapukan dedaunan, batang

pohon dll. Suplai nutrient oleh sungai hamper tidak ada sehingga pohon mangrovenye kerdil dan pendek.

Tipe *hammock*: terletak pada posisi yang agak tinggi sehingga tidak setiap hari tergenang air laut, maupun air sungai. Lahan mangrove tipe *hammock* hanya dapat dicapai air laut pada saat banjir besar. Material lahan lebih banyak dihasilkan dari proses pelapukan bahan-bahan interior.

Klasifikasi ekotipe yang dikemukakan oleh Lugo dan Snedaker sering dijadikan acuan, namun para pakar adakalanya mengembangkan klasifikasi yang berbeda, bergantung pada tujuan kajiannya (Cleveland, 2001). Berdasarkan karakteristik topografi dan hidrologi, Cleveland (2001) memodifikasi klasifikasi Lugo dan Snedaker menjadi empat ekotipe mangrove yakni tipe *fringe*, *riverine*, *basin*, dan *scrub*. Tipe *fringe* menjadi batas sekaligus melindungi garis pantai, kanal, dan laguna, dan digenangi pasut pada setiap hari. Tipe *riverine* adalah mangrove yang bertumbuh sepanjang sisi alur sungai dan secara periodic mendapat suplai air segar yang kaya akan nutrisi. Mangrove tipe *basin* biasanya terletak sevelah dalam dari mangrove tipe *fringe*, yang dapat digenangi pasut tapi dengan aliran yang kecepatannya rendah. Hutan mangrove tipe *scrub* atau dikenal dengan hutan mangrove cebol (*dwarf forests*) bertumbuh di lokasi kurang air sehingga hutan mangrove di lokasi ini dicirikan oleh evaporasi yang tinggi, salinitas yang tinggi, suhu yang rendah, dan status nutrient yang rendah. Kondisi lingkungan ini menjadi penghambat terhadap pertumbuhan mangrove

Cintron and Novelli (1984) memodifikasi klasifikasi Lugo and Snedaker menjadi tiga klasifikasi yakni: *fringe forest*, *riverine forest*, dan *basin forest*. Klasifikasi ini didasarkan pada fitur topografi. Klasifikasi ini lebih sering digunakan untuk mendeskripsikan kondisi hutan mangrove sesungguhnya (*true mangrove*). Dalam klasifikasi ini, Cintron dan Novelli mendefinisikan masing-masing klasifikasi tipe sebagai berikut:

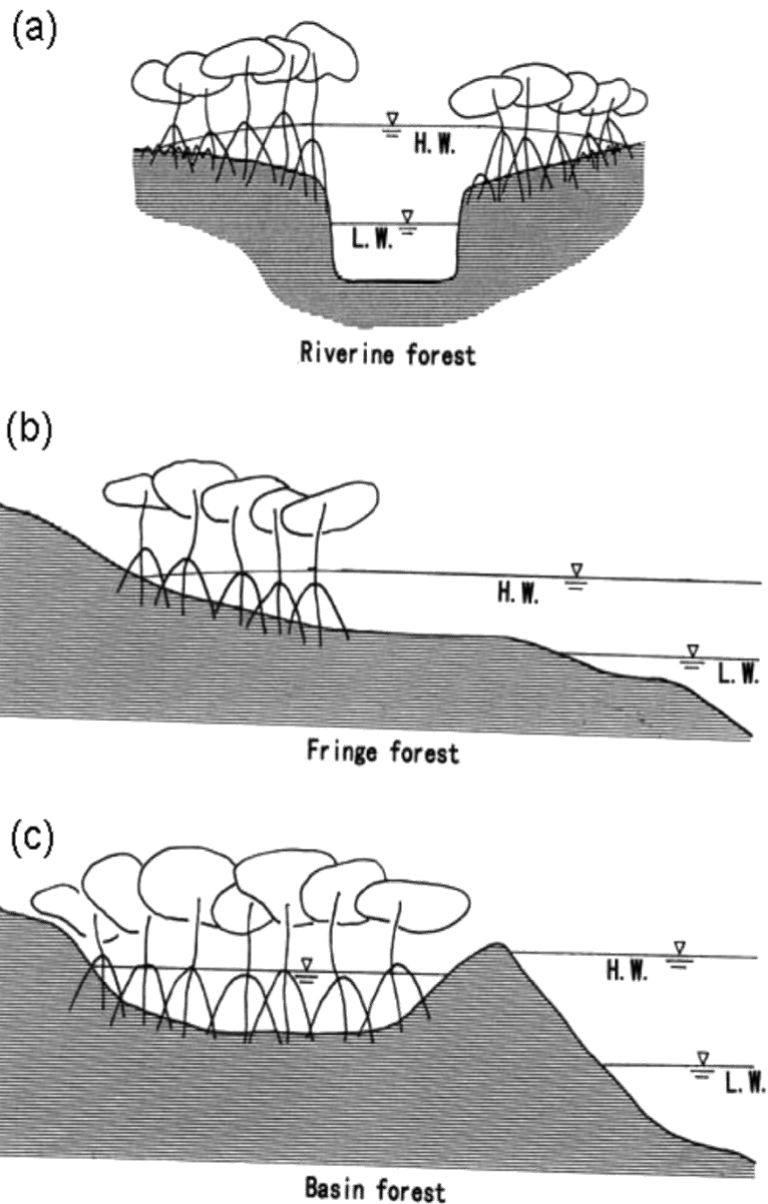
- 1) *Riverine forest* atau tipe-R, adalah tipe bentang lahan dataran banjir (*floodplains*) sepanjang alur sungai alur pasut (*tidal creeks*), yang tergenang saat air pasang dan terbuka pada saat air surut. Penampang mangrove tipe-R ini diperlihatkan pada

Gambar-1.11a. Alur pasut atau sungai biasanya tegak lurus terhadap garis pantai atau garis batas mangrove dengan laut. Gelombang laut biasanya menjadi lemah akibat pengamburan energi gelombang oleh alur pasut (Kobashi and Mazda, 2005; Mazda *et al.*, 2005).

- 2) *Fringe forest* atau tipe-F. Penampang bentang lahan mangrove tipe F-ini disajikan pada Gambar-1.11b. Mangrove tipe F ini tidak berada di alur sungai, seperti tipe R. Dalam keadaan normal tanpa banjir mangrove tidak secara langsung dipengaruhi oleh aliran sungai. Material sedimentasi yang diangkut dari daratan oleh sungai, diteruskan oleh air laut dan membentuk lahan bercampur material lain yang diangkut oleh air laut.

Pada setiap hari perakaran mangrove tergenang oleh air laut; lamanya genangan bergantung pada tingginya permukaan air pasut setiap hari. Pengaruh pasut sangat besar dalam mengendapkan material atau mengangkut material dari dalam butan mangrove. Tipe mangrove memiliki peran penting dalam mengurangi pengikisan pantai oleh pasut dan ombak. Perakaran mangrove merubah pola aliran dan mereduksi kecepatan arus laut sehingga dapat mencegah erosi pantai. Energi ombak direduksi oleh perakaran dan batang yang berlapis dan bersifat elastic.

- 3) *Basin Forest* (atau tipe-B). Penampang bentang lahan mangrove tipe-B ini disajikan pada Gambar-1.11c. Bentang lahan ini biasanya terbentuk dari beberapa cekungan atau kolam yang tergenang pada saat air pasang. Air yang masuk disini merupakan percampuran dari air laut dengan air segar dari daratan dalam bentuk rembesan tapi tidak membentuk alur sungai. Kecepatan aliran air (pasut) relative rendah karena direduksi tanggul-tanggul alamiah dan perakaran mangrove.



Gambar-1.11. Ekotipe hutan mangrove menurut Cintron and Novelli (1984) Setiap ekotipe mangrove tersebut di atas dikarakterisasi oleh pola struktur hutan yang berbeda, produktivitas dan biogeokimia yang berbeda, yang semuanya dikontrol oleh kombinasi faktor-faktor hidrologi (pasut, pasokan air segar, curah hujan), karakteristik tanah, interaksi biologis, efek badai, dan kekuatan-kekuatan lainnya.

b. Karakteristik ekologis hutan mangrove

1) Genangan pasang surut air laut

Hutan mangrove bertumbuh di atas substrat yang agak asing karena itu hutan mangrove bertumbuh pada area yang secara periodik digenangi pasang surut air laut. Perakaran mangrove berfungsi menahan dan mengendapkan sedimen baik dari laut maupun daratan sehingga permukaan substrat relatif datar dengan material permukaan yang halus. Kondisi genangan akan menentukan kadar salinitas, dan tentunya menentukan jenis hutan mangrove yang bertumbuh dan berkembang pada area tersebut.

2) Temperature atau suhu

Hutan mangrove bertumbuh di daerah tropis dan subtropics dengan suhu udara lebih dari 20°C dan fluktuasinya tidak melebihi 5°C . Hutan mangrove bertumbuh pada rata-rata suhu permukaan laut 24°C . Kenaikan suhu melebihi rata-rata permukaan laut ini dapat menyebabkan species tertentu bergeser ke tempat yang lebih tinggi yang masih terjangkau arus laut yang berfungsi menyebarkan bibit mangrove (Kathiresan, 2004). Lebih lanjut menurut Kathiresan (2004), kenaikan suhu yang berlebihan dapat berpengaruh pada daun mangrove dan dapat menyebabkan turunya kapasitas fotosintesa, sehingga akan mempengaruhi pertumbuhan mangrove. Kenaikan suhu yang tidak besar tidak akan mempengaruhi proses pembentukan bunga dan tidak akan mengubah siklus reproduksi dari terbentuknya bunga hingga jatuhnya benih yang sudah matang. Pengaruh temperature air maupun udara mengindikasikan bahwa kenaikan suhu air laut akibat pemanasan global akan berdampak pada pertumbuhan dan pola penyebaran species mangrove.

3) Kadar Garam atau Salinitas

Kadar garam atau salinitas air laut memiliki peran penting terhadap pertumbuhan hutan mangrove dan penyebarannya. Jenis atau species mangrove tertentu toleran terhadap kadar garam tertentu. Menurut

Kathiresan (2004), jenis *Rhizophora mucronata* tumbuh dan berkembang dengan baik pada kadar garam 30 %, sedangkan but *Rhizopora apiculata* bertumbuh baik pada kadar garam 15 %. *Sonneratia alba* bertumbuh pada kadar garam antara 2 % hingga 18 %, sedangkan *Sonneratia lanceolata* hanya toleran pada kadar garam tertinggi 2 %. Tingginya kadar garam yang mempengaruhi pertumbuhan dan penyebaran species mangrove selain dikontrol oleh air laut juga ditentukan oleh suplai air segar yang dapat menurunkan kadar garam. Kadar garam lumpur ditentukan oleh lamahnya genangan air laut, sehingga kondisi topografi menentukan pertumbuhan dan penyebaran species mangrove karena pengaruh kadar garam

4) Curah Hujan dan Pasokan Air Segar

Curah hujan dan pasokan air segar dari permukaan maupun yang keluar dari bawah tanah akan menentukan perimbangan kadar garam dengan air laut. Suplai air segar dapat diindikasikan dengan perbandingan curah hujan terhadap evapotranspirasi. Menurut Kathiresan (2004) pada keadaan iklim lembab, perbandingan curah hujan terhadap evapotranspirasi melebihi satu, dan mangrove dapat bertumbuh dengan subur. Pada keadaan kering dimana angka perbandingan kurang dari satu hutan mangrove akan menjadi kerdil.

5) Karakteristik sedimen

Faktor penting dalam pertumbuhan mangrove adalah konsentrasi nutrient. Suplai nutrient sangat bergantung pada asimilasi tumbuhan dan proses mineralisasi secara microbial (Alongi, 1996). Dua unsure penting yang dibutuhkan dalam pertumbuhan mangrove adalah Nitrogen dan Fosfor. Konsentrasi nitrogen terlarut pada umumnya rendah di perairan mangrove di daerah tropis. Beberapa organisme mikro berperan mengambil N_2 dari udara dan mengubahnya menjadi ammonium dalam tanah, sehingga nitrogen dapat digunakan oleh tumbuhan (Kathiresan, 2004). Ammonia adalah bentuk utama nitrogen anorganik dalam tanah (mangrove). Nitrogen ini bersenyawa dengan oksigen nitrit atau nitrat melalui proses nitrifikasi yang digunakan oleh tumbuhan. Proses ini berlangsung di zona perakaran mangrove. Seperti halnya nitrogen,

konsentrasi phosphor anorganic juga umumnya rendah di perairan di hutan mangrove. Dalam keadaan normal phosphor anorganic tersedia dalam bentuk garam terlarut yang dapat langsung digunakan oleh tumbuhan. Phosphate diserap secara lebih efisien oleh sedimen-sedimen yang halus daripada yang kasar. Hal ini diduga menjadi penyebab mangrove bertumbuh lebih baik pada lingkungan berlumpur dibanding berpasir.

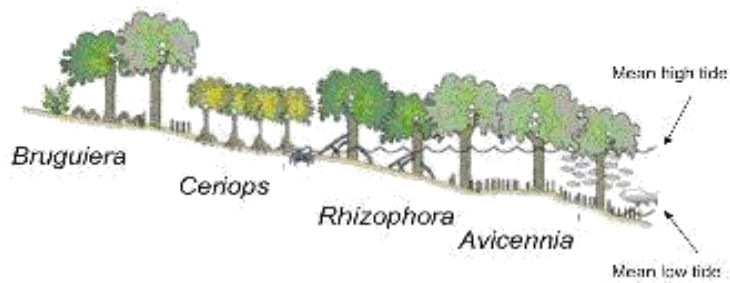
1.3. Jenis dan Fungsi/Kemanfaatan Hutan Mangrove

a. Jenis-jenis hutan mangrove

Menurut Saenger (1998), ada sekitar 80 spesies mangrove yang ditemui di dunia. Kebanyakannya ditemui di pesisir pantai tropis dan sub tropis. Menurut Bengen (2000), hutan mangrove meliputi pohon dan semak yang tergolong ke dalam 8 famili, dan terdiri atas 12 genera tumbuhan berbunga yakni : *Avicennia*, *Sonneratia*, *Rhizophora*, *Bruguiera*, *Ceriops*, *Xylocarpus*, *Lumnitzera*, *Laguncularia*, *Aegiceras*, *Aegiatilis*, *Suaeda*, dan *Conocarpus*. Di beberapa tempat, tumbuhan mangrove bertumbuh berjejer seperti pada Gambar-1.12.

Pola pertumbuhan tersebut tidak berlaku umum atau mutlak. Pola pertumbuhan dan sebaran jenis mangrove sangat bergantung pada kondisi ekologis yang menentukan ekotipe hutan mangrove. Keragaman jenis mangrove yang bertumbuh pada satu area ditentukan oleh berbagai factor diantaranya kadar garam air, kandungan nutrisi dan pasokan lumpur, bentuk permukaan lahan. Berdasarkan jenisnya, hutan hutan mangrove diklasifikasikan atas:

- a. Mangrove major
- b. Mangrove minor
- c. Tumbuhan asosiasi



Gambar-1.12. Pola sebaran (tidak berlaku umum) jenis hutan mangrove (sumber: Saenger, 1998)

Identifikasi jenis hutan mangrove dapat didasarkan pada bentuk daun dan buah, dan bentuk akar. Bentuk daun dan buah beberapa jenis mangrove major diperlihatkan pada Gambar-1.13 (sumber: Setyawan, 2005). Bentuk perakaran pohon mangrove major disajikan pada Gambar-14

a. Kategori : **mangrove mayor**



Avicennia alba

Avicennia marina

Avicennia officinalis

Gambar-1.13a. Bentuk daun dan buah pohon mangrove major



Sonneratia alba

Sonneratia caseolaris

Sonneratia ovata



Bruguiera cylindrical

Bruguiera gymnorrhiza

Bruguiera parviflora



Ceriops sexangula

Ceriops decandri

Ceriops tagal

Gambar-1.13a. Bentuk daun dan buah pohon mangrove major (lanjutan)



Rhizophora apiculata

Rhizophora mucronata

Rhizophora stylosa

Gambar-13a. Bentuk daun dan buah pohon mangrove major (lanjutan)

b. Kategori : **mangrove minor**



Achrostichum aureum



Acrostichum speciosum



Aegiceras corniculatum



Aegiceras floridum

Gambar-1.13b. Bentuk daun dan buah pohon mangrove minor



Excoecaria agallocha



Heritiera littoralis



Scyphiphora hydrophyllacea



Xylocarpus granatum



Xylocarpus moluccensis



Xylocarpus rumphii

Gambar-13b. Bentuk daun dan buah pohon mangrove minor (lanjutan)

c. Kategori : **Tumbuhan asosiasi**



Acanthus ilicifolius



Barringtonia asiatica



Calophyllum inophyllum



Calotropis gigantea



Cerbera manghas



Clerodendrum inerme

Gambar-1.13c. Bentuk daun dan buah pohon (tumbuhan) asosiasi

Bentuk-bentuk perakaran mangrove major



Akar penyangga *Rhizophora*

Akar pensil *Sonneratia*



Akar lutut *Bruguiera*

Akar papan/banir *Xylocarpus*

Gambar-1.14. Bentuk perakaran mangrove major

b. Fungsi dan Kemanfaatan Hutan Mangrove

Fungsi hutan mangrove, meliputi : fungsi ekologis, fungsi social, dan fungsi ekonomi. Fungsi ekologis berkaitan dengan fungsi hutan mangrove untuk melindungi ekosistem pantai, Fungsi sosial berkaitan dengan kemanfaatan untuk masyarakat, terutama masyarakat yang berdiam di daerah pantai. Fungsi ekonomi berkaitan dengan berbagai pemanfaatan area dan pohon mangrove sebagai sumber pendapatan masyarakat. Ketiga fungsi ini berkaitan satu sama lain. Beberapa fungsi hutan mangrove adalah sebagai berikut :

1) Fungsi ekologis :

- a) Hutan mangrove menjadi tempat bertelur, berkembang biak dan berlindungnya berbagai jenis ikan dan hewan laut. Di pantai yang ditumbuhi hutan mangrove lebat, lebih banyak ditemui jenis ikan atau hewan laut dibandingkan di pantai yang tidak ditumbuhi hutan mangrove. Hutan mangrove berperan mengatur rantai makanan bagi organisme yang hidup di daerah pasang surut, tempat bertelur dan menetas ikan dan berbagai hewan perairan pantai.
- b) Hutan mangrove menjadi tempat berteduh dan bertelurnya jenis satwa tertentu.



- c) Melindungi wilayah pantai dari pengaruh angin/badai dari arah laut. Hutan mangrove yang lebat dan tinggi sangat baik melindungi wilayah pemukiman di tepi pantai. Kita dapat membandingkan pengaruh angin atau badai terhadap rumah yang berada di pantai terbuka dengan yang terlindungi hutan mangrove.



- d) Melindungi wilayah pantai dari pengaruh ombak, dan mengurangi dampak dari tsunami. Perakaran dan batang mangrove yang rapat akan menahan dan akhirnya mengurangi kekuatan gelombang yang akan terhempas di pantai. Kita dapat membandingkan perubahan yang terjadi di pantai yang terbuka dan pantai terlindungi hutan mangrove, setelah terjadi ombak besar



- e) Melindungi lahan pantai dari pengaruh pengikisan oleh arus dan pasang surut. Perakaran mangrove yang rapat akan mengurangi kecepatan dan dapat mengubah arah arus sehingga mengurangi pengikisan lahan pantai. Kita dapat membandingkan terjadinya pengikisan lahan pantai pada bagian pantai yang terbuka dengan pantai yang terlindungi hutan mangrove



- f) Mengurangi tekanan air laut terhadap air tanah di daerah pantai. Fungsi ini dapat menjamin keberadaan air segar di sumur di daerah pantai. Di bandingkan dengan pantai terbuka, air sumur di pantai yang terlindungi hutan mangrove kurang dipengaruhi oleh air laut.
- g) Melindungi padang lamun dan terumbu karang dari pengaruh pencemaran air dari wilayah daratan. Sungai yang mengalir melalui wilayah pemukiman padat atau melalui pabrik dan usaha yang membuang limbah cairnya ke sungai, akan membawa bahan pencemaran yang diteruskan ke arah laut. Jika dipantai terdapat hutan mangrove, maka perakaran hutan mangrove akan menahan bahan pencemar sehingga mengendap bersama lumpur di perakaran mangrove dan mengurangi bahan pencemar yang terbawa air ke arah padang lamun dan terumbu karang

h) Hutan mangrove berfungsi menyerap karbon dari udara sehingga akan mengurangi dampak rumah kaca yang menyebabkan rentetan masalah lingkungan seperti pemanasan global, kenaikan permukaan laut dll.

2) Fungsi Sosial

a) Pemanfaatan daerah pantai untuk pemukiman. Daerah pantai yang terlindungi hutan mangrove menjadi tempat pemukiman yang lebih aman dan lebih nyaman dibandingkan tempat terbuka. Hutan mangrove akan melindungi pemukiman dari pengaruh badai dan gelombang. Hutan mangrove juga akan menjadikan wilayah pemukiman di pantai lebih nyaman dibandingkan dengan pemukiman di tepi pantai terbuka



b) Pemanfaatan pohon mangrove sebagai bahan konstruksi rumah. Batang mangrove banyak dimanfaatkan oleh masyarakat pesisir di berbagai tempat di Indonesia, sebagai bahan konstruksi rumah



- c) Hutan mangrove menjadi sumber nafkah bagi masyarakat setempat karena menyediakan berbagai bahan pangan (ikan dan hewan laut)
- d) Hutan mangrove menjadi tempat rekreasi dan tempat belajar siswa (dalam alam)





- e) Hutan mangrove menjadi tempat melabuhkan perahu yang aman bagi nelayan dan masyarakat yang bermukim di tepi pantai. Tempat berlabu dipantai aman dari pengaruh ombak atau arus pantai.



- f) Mengamankan jalan dan bangunan lain di tepi pantai dari pengaruh ombak dan arus laut. Tanggul atau bangunan/konstruksi beton di tepi pantai yang dibangun dengan biaya mahal, cepat rusak karena pengaruh ombak dan arus. Perakaran hutan mangrove yang rapat dapat mengurangi pengaruh ombak dan arus laut terhadap konstruksi di tepi pantai



- g) Pemanfaatan pohon, daun dan buah mangrove untuk obat-obatan. Masyarakat yang bermukim di pantai di beberapa wilayah di Indonesia seperti di Irian, Sulawesi, dan Jawa memanfaatkan tumbuhan mangrove untuk obat-obatan

3) Fungsi Ekonomi

- a) Pemanfaatan area hutan mangrove untuk tambak udang dalam berbagai skala. Gambar di bawah ini memperlihatkan pemanfaatan area mangrove untuk tambak udang di muara sungai Mahakam di Kalimantan. Di Sulawesi Utara, perombakan area hutan mangrove untuk tambak udang antara lain di desa Serawet, Kabupaten Minahasa Utara



- b) Pemanfaatan area mangrove untuk budidaya ikan. Contoh budidaya ikan bandeng di area hutan mangrove di Kalimantan Timur



- c) Pemanfaatan area-hutan mangrove untuk tambak garam. Ladang garam di p. Madura semula adalah hutan mangrove yang sudah dirombak menjadi area tambak

- d) Pemanfaatan area hutan mangrove untuk pariwisata. Di beberapa Negara, area hutan mangrove banyak dikembangkan sebagai area wisata (ekowisata). Area hutan mangrove dimanfaatkan sebagai area wisata antara lain karena daya tarik dan keindahannya, banyaknya biota perairan dan satwa yang berdiam dan mencari makan dalam hutan mangrove, kenyamanannya dll

- e) Pemanfaatan batang pohon mangrove untuk pembuatan perangkap ikan



- f) Pemanfaatan buah mangrove sebagai bahan kosmetik. Pemanfaatan daun dan buah mangrove sebagai bahan kosmetik telah banyak dilakukan di negara Cina dan menjadi sumber pendapatan masyarakat



- g) Pemanfaatan buah mangrove sebagai bahan kueh. Pemanfaatan buah mangrove sebagai bahan kue antara lain dikembangkan di Negara Cina



Penjelasan tentang fungsi (ekologis, social dan ekonomi) hutan mangrove adalah sebagai berikut:

1) Fungsi Ekologis

Ekosistem mangrove kaya biodiversitas dan memiliki peran ekologis penting di lingkungan pantai. (Kusmana *et al.*, 2003; Soemodihardjo, *et al.*, 1996). Secara ekologis hutan mangrove berinteraksi dengan lingkungannya, misalnya air sungai mensuplai lumpur dan material transport lainnya yang diendapkan di perakaran mangrove. Air laut mengontrol kadar garam dan proses sedimentasi material dari laut atau sebaliknya mengangkut material yang ada di perakaran mangrove dll. Fungsi-fungsi ekologis hutan mangrove antara lain adalah:

a) Sebagai tempat berlangsungnya siklus kehidupan

Banyak organism yang hidup di dalam hutan mangrove, seperti kepiting, reptile dan berbagai jenis burung. Biota dalam hutan mangrove bergerak atau berpindah-pindah untuk mencari makan atau kawin mengikuti perubahan alam (penyinaran, suhu udara, pergerakan pasut dll). Interdependensi antara kondisi hutan mangrove dengan kehidupan biota di dalamnya menjadi karakteristik hutan mangrove. Hutan mangrove menyediakan menyediakan remah-remah organic untuk kepiting, ikan, serta menyediakan makanan bagi reptile dalam berbagai ukuran. Pada akhirnya organism organism yang mati akan terurai menjadi bahan organic yang menyuburkan hutan mangrove. Ekosistem ini sangat kompleks dimana rantai makanana dan proses transfer energy memegang peranan penting dalam keseimbangan ekologis alamiah.

b) Mempertahankan keseimbangan ekologis alam

Melalui proses fotosintesa, hutan mangrove memasok nutrient dan oksigen bagi hewan dan tumbuhan dalam ekosistem. Dalam kedudukannya sebagai penghubung ekosistem laut dan daratan, hutan mangrove berperan penting dalam menstabilisasi perbedaan energy termal yang tinggi antara daratan dengan lautan, sekaligus menyerap energy untuk pertumbuhan mangrove dan kehidupan insekta, reptile, invertebrata, dan berbagai mikroorganisme akuatik yang hidup di dalam mangrove

c) Menjadi tempat mencari makan dan berteduhnya hewan dan burung. Hutan mangrove menyiapkan makanan yang berlimpah untuk berbagai hewan, burung dan ikan. Pepohonan mangrove menjadi tempat bernanung dan bersembunyi hewan-hewan pada keadaan cuaca yang tidak menguntungkan. Banyak hewan menghabiskan sebagian besar atau seluruh waktunya untuk berada di dalam hutan mangrove. Kebanyakan species burung air (waterfowls) mencari makan di hutan mangrove. Species-species ini umumnya memangsa organism akuatik seperti ikan, udang, kepiting dan cacing. Karena alasan ini maka hutan mangrove menjadi habitat ideal bagi species-species tersebut.

d) Mengurangi polusi air

Sistem perakaran species mangrove mengabsorbsi baban-bahan an organis dan mereduksi polusi air. Melalui metabolisme mikroorganisme, absorbs permukaan tanah, penguraian secara kimiawi dan oleh tumbuhan, maka konsentrasi partikel-partikel yang mengandung nitrogen dan fosfor dalam air akan menurun

e) Melindungi garis pantai

Hutan mangrove berfungsi menstabilisasi dan melindungi garis pantai dari pengaruh pengikisan oleh air sungai dan ombak. Di banyak tempat, lahan pantai mengalami kerusakan parah akibat pengaruh ombak dan banjir sungai karena hutan mangrove yang berfungsi melindunginya telah dibabat.

f) Mencegah banjir

Hutan mangrove berperan penting untuk menjaga keberadaan ikan di perairan pantai dan lepas pantai. Selain menjadi habitat pesisir pantai yang kaya

nutrient, hutan mangrove menjadi lingkungan hidup ideal bagi banyak jenis ikan, udang, kepiting dan organism akuatik lainnya.

2) Fungsi Ekonomi

Kekayaan atau nilai ekonomi area mangrove tentunya sangat bergantung pada luasan dan kepadatan hutan mangrove. Luas dan kepadatan tersebut, juga menentukan besarnya dampak yang ditimbulkan oleh setiap jenis atau bentuk kegiatan pemanfaatan hutan mangrove. Soemodihardjo *et al.*, (1996) menyebutkan bahwa potensi hutan mangrove dan besarnya dampak yang ditimbulkan oleh pemanfaatan ekosistem mangrove bergantung pada jenis pemanfaatan dan dimensi fisik (luasan, kerapatan pohon, dan ketebalan canopy) hutan mangrove. Kemanfaatan ekonomis hutan mangrove dan permasalahannya antara lain adalah:

a) Pemanfaatan batang mangrove sebagai kayu bakar.

Beberapa decade yang lalu, pohon mangrove banyak dimanfaatkan masyarakat yang berdiam di sekitar pantai sebagai bahan bakar. Pemanfaatan batang mangrove sebagai kayu bakar tidak hanya untuk penggunaan sendiri oleh keluarga yang bermukim di pesisir pantai tapi untuk dijual dalam bentuk kayu atau arang kayu. Ruitenbeek (2002) mengemukakan bahwa dalam beberapa decade yang lalu, negara- negara di Asia Tenggara seperti India, Bangladesh, Philipina, Malaysia dan Indonesia banyak melakukan penebangan pohon mangrove untuk dijadikan bahan bakar. Ruitenbeek (2002) melaporkan bahwa pemanfaatan secara tradisional hutan mangrove di Bintuni Papua yang luasnya 300.000 ha (untuk bahan bakar dan perikanan) menghasilkan US\$ 10 juta pertahun. Pemanfaatan ini cukup terkendali dan tidak member dampak lingkungan yang berarti.

Saat ini pemanfaatan batang mangrove sebagai kayu bakar sudah terkendali karena pengawasan yang ketat dan kesadaran akan masyarakat akan pentingnya hutan mangrove. Kebanyakan masyarakat yang berdiam di pesisir pantai suda dapat berperan mengawasi pemanfaatan hutan mangrove di sekitarnya. Di beberapa tempat, masyarakat secara swadaya telah menanam mangrove dipantai sekitar lokasi pemukiman.

b) Pemanfaatan area hutan mangrove untuk tambak udang, ikan dan garam. Perombakan area mangrove untuk tambak udang, ikan (bandeng) dan garam memiliki keuntungan ekonomi yang sangat besar, namun memberi dampak ekologi yang sangat parah. Fungsi ekologis hutan mangrove menjadi hilang karena perombakan area dalam ukuran yang besar. Setyawan dan Winarno (2006), mencatat bahwa pemanfaatan area hutan mangrove untuk tambak menjadi penyumbang terbesar kerusakan ekosistem mangrove di pesisir Kabupaten Rembang. Di kawasan ini tambak merupakan pemandangan umum, baik tambak udang dan bandeng maupun tambak garam. Pada musim penghujan, tambak garam yang bersalinitas tinggi biasanya juga diubah menjadi tambak bandeng, sehingga kawasan ini menjadi pemasok bandeng budidaya terbesar di Jawa Tengah setelah kabupaten tetangga baratnya, Pati. Kawasan pesisir Rembang juga menjadi penghasil garam terbesar di Jawa Tengah. Pertambakan ditemukan sepanjang pantai mulai dari Pecangakan hingga Lasem. Tambak-tambak ikan dan udang di kawasan ini dikelola secara intensif hingga jauh ke arah daratan. Hampir semua pantai yang mengalami sedimentasi membentuk dataran lumpur dan memiliki ekosistem mangrove diubah menjadi areal tambak, meskipun beberapa areal tambak yang jauh dari bibir pantai tampaknya tidak lagi produktif akibat perubahan kondisi hidrologi, edafit (tanah sulfat asam), penyakit dan pencemaran lingkungan, sehingga tambak beserta sarana produksinya dibiarkan rusak tidak terurus. Pertambakan rakyat secara nyata mempengaruhi keberadaan mangrove di sekitarnya. Pada saat ini tidak lagi tersisa ekosistem mangrove alami. Ekosistem mangrove yang ada merupakan ekosistem buatan yang diupayakan oleh pemerintah, masyarakat, dan para pihak lain. Pemanfaatan area hutan mangrove memberikan keuntungan ekonomi cukup tinggi bagi masyarakat sekitar, karena usaha/kegiatan ekonomi ini melibatkan semua masyarakat. Dari segi ekologi, fungsi hutan mangrove sudah rusak sama sekali, sehingga kekayaan dan keaneka ragaman potensi hutan mangrove sudah hilang.

Hasil studi yang dilaporkan oleh Bann (2003), menyimpulkan bahwa tambak udang di provinsi Ko Kong, Kamboja tidak menguntungkan (*unprofitable*) dan tidak berkelanjutan (*unsustainable*). Petani banyak yang menghentikan usahanya setelah lima tahun beroperasi. Walaupun 50% petani mengalami

keuntungan pada tahun sebelumnya, namun secara keseluruhan petani tambak mengalami rata-rata kerugian sebesar US\$1,103 per hektar. Kebanyakan petani mengalami kegagalan karena. Kerugian perindividu berkisar antara US\$40, 000 hingga US\$240, 000. Biaya riil perusahaan tambak lebih besar dari harga ini.

Bann lebih lanjut mengemukakan bahwa analisis pengembangan usaha tambak ini tidak memperhitungkan biaya lingkungan (*environmental costs*) yang berkaitan dengan perusahaan tambak. Ketidak berlanjutan tambak udang ini berkaitan dengan pencemaran air dan pembabatan mangrove yang sangat ekstensif untuk kepentingan pembuatan tambak. Masalah tambak ini juga memberi dampak yang menyedihkan bagi masyarakat lokal. Pada saat area mangrove akan dirombak jadi tambak udang, lebih dari 90% masyarakat lokal menolak. Hal ini memunculkan kesenjangan sosial dan masalah keamanan. Hasil survei menunjukkan bahwa 94% penduduk yang telah datang ke area hutan mangrove tersebut karena tertarik dengan potensi perikanan dan arang dari batang mangrove yang sekarang sudah menurun jauh. Pemanfaatan area hutan mangrove untuk tambak masih merupakan ancaman pada beberapa bagian di wilayah pantai Indonesia.

c) Ekowisata Hutan Mangrove

Kecenderungan pemanfaatan hutan mangrove sebagai lokasi wisata, pendidikan dan penelitian berkembang pesat dewasa ini. Mwaipopo and Lufumbi (2009), menyatakan bahwa sejak tahun 1980, pemanfaatan area mangrove untuk kegiatan wisata meningkat tajam. Seiring dengan itu, eksploitasi area mangrove meningkat tajam karena pembangunan hotel, shelter, pembuatan fasilitas untuk rekreasi seperti kolam, pembuatan jalur lalu lintas motor laut, dll.

Pemanfaatan area mangrove sebagai ekowisata dalam skala industri pariwisata antara lain di Taman Alam Kuala Selangor Malaysia. Kawasan wisata ini sangat terkenal karena mudah dijangkau dari Kualalumpur (Giesen *et al.*, 2007). Di kawasan seperti ini masyarakat sudah dipindahkan (resettlement), sehingga pemerintah dapat lebih mudah mengembangkan alternatif-alternatif kegiatan ekonomi maupun pelestarian sumberdaya dan lingkungan.

1.4. Bahan Instruksional

A. Pengertian Hutan Mangrove

Tujuan Kegiatan Belajar

- *Mahasiswa memahami hubungan antara pengalamannya dengan definisi ilmiah tentang hutan mangrove*
- *Mahasiswa dapat menjabarkan ciri-ciri hutan mangrove di lapangan berdasarkan definisi hutan mangrove*

Kegiatan – 1 Mengenali Hutan Mangrove secara Ilmiah

- Membentuk kelompok diskusi
- Tunjukkan seorang pemimpin diskusi dan seorang lainnya sebagai sekretaris yang menuliskan kesimpulan diskusi. Pimpinan diskusi dan sekretaris merangkap anggota kelompok belajar
- Pemimpin diskusi mengemukakan pengertiannya tentang hutan mangrove, anggota kelompok menanggapi
- Seorang anggota kelompok membacakan definisi hutan mangrove sbb :

Hutan mangrove adalah hutan yang bertumbuh di pantai, perakarannya tergenang oleh air laut pada saat air pasang dan terbuka saat air surut

- Kelompok berdiskusi membandingkan pengertian sebelumnya dengan definisi hutan mangrove
- Kelompok berdiskusi untuk mengidentifikasi tumbuh-tumbuhan yang tergenang saat air pasang dan terbuka saat air surut
- Kelompok berdiskusi tentang perbedaan hutan mangrove dengan hutan di lahan kering
- Kelompok berdiskusi merumuskan ciri khas hutan mangrove. Sekretaris kelompok mencatat kesimpulan-kesimpulan diskusi

B. Ekosistem Hutan Mangrove

Tujuan Kegiatan Belajar

- *Mahasiswa memahami pengertian ekosistem*
- *Mahasiswa dapat menyebutkan komponen-komponen ekosistem dan pengaruhnya berdasarkan pengalaman atau pengamatan*
- *Mahasiswa memahami secara ilmiah lingkungan dan bentuk interaksi hutan mangrove dengan lingkungannya*

Kegiatan – 2 Mengidentifikasi Makhluk Hidup Dalam Hutan Mangrove

- Membentuk kelompok diskusi
Tunjuklah seorang pemimpin diskusi dan seorang lainnya sebagai sekretaris yang menuliskan kesimpulan diskusi (*sama dengan kegiatan-1 atau diubah*)
- Pemimpin diskusi memberikan kesempatan kepada anggota kelompok untuk mengemukakan hasil pelaksanaan tugas kegiatan - 1
- Seorang anggota kelompok membacakan definisi ekosistem sbb :

Ekosistem ialah satu kesatuan yang terdiri oleh hubungan timbal balik antara makhluk hidup dengan lingkungannya (Wikipedia Bahasa Indonesia)

- Pemimpin diskusi menunjuk anggota kelompok secara bergantian menyebutkan jenis makhluk hidup yang ada di dalam hutan mangrove, anggota lainnya menanggapi.
- Sekretaris , dibantu anggota kelompok menuliskan hasil diskusi pada tabel yang tersedia (*form isian kegiatan-2*):

Format isian kegiatan-2 : Mengidentifikasi Makluk Hidup Dalam Hutan Mangrove

Nama makluk hidup	Hidup dalam hutan mangrove		Ada di hutan mangrove disini	ada di hutan mangrove di
	di air	di udara		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

Ket. Kolom-1 diisi dengan makluk hidup yang ada di hutan mangrove di desa sendiri atau di tempat lain
 Kolom-4 diisi dengan : dahulu ada sekarang punah, atau bertambah jumlahnya, atau tetap jumlahnya atau berkurang jumlahnya Kolom-5 diisi nama desa dimana terdapat hutan mangrove dan makluk hidup tersebut.

Kegiatan-2 (*lanjutan*)

- Kelompok membuat kesepakatan untuk mengamati makluk hidup dalam hutan mangrove di desa sendiri. Anggota yang lebih mengetahui menjelaskan kepada anggota lainnya
- Kelompok menyusun laporan kegiatan pengamatan dan hasil diskusi dengan nara sumber

Kegiatan – 3 Mempelajari Interaksi Makluk Hidup dengan Lingkungannya

- Membentuk kelompok diskusi :
Tunjuklah seorang pemimpin diskusi dan seorang lainnya sebagai sekretaris yang menuliskan kesimpulan diskusi (*sama dengan kegiatan sebelumnya atau diubah*)
- Pemimpin diskusi memberikan kesempatan kepada anggota kelompok untuk mengemukakan hasil pelaksanaan tugas kegiatan - 2
- Kelompok berdiskusi membahas masukan tugas terhadap form isian kegiatan-2
- Pemimpin diskusi memberikan arahan untuk pengisian form —interaksi makhluk hidup dengan lingkungannya, dilanjutkan dengan pembagian tugas (perorangan atau kelompok lebih kecil) untuk mengisi form tersebut dengan data yang dihasilkan dari kegiatan - 2
- Tugas yang dikerjakan dimasukkan dalam form isian kegiatan-3
- Kelompok berdiskusi : masing-masing anggota atau kelompok kecil menyampaikan hasil pekerjaannya secara bergantian; anggota kelompok lainnya menanggapi
- Sekretaris dibantu oleh anggota kelompok merevisi form isian sesuai hasil diskusi
- Pemimpin diskusi merencanakan kegiatan pengamatan interaksi makluk hidup dengan lingkungannya
- Kelompok secara bersama melakukan pengamatan dan merevisi form isian sesuai hasil pengamatan.
- Kelompok berdiskusi lagi dan sekretaris merampungkan form isian
- Pemimpin diskusi dan setiap anggota kelompok meminta penjelasan dari orang yang dianggap lebih mengetahui interaksi makluk dalam hutan mangrove.

•
Format isian kegiatan -3 : Mempelajari Interaksi Makhluk Hidup dengan Lingkungannya

Nama makhluk hidup	Interaksi dgn makhluk hidup lain		Interaksi dengan unsur alam	
	makhluk hidup lain	Bentuk interaksi	Unsur alam	Bentuk interaksi
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

Ket. : Kolom-1 diisi dengan makhluk hidup yang ada di hutan mangrove di desa sendiri atau di tempat lain, yang sudah diidentifikasi dari kegiatan-2
 Kolom-2 diisi dengan makhluk hidup lain yang berinteraksi (saling mempengaruhi) dengan makhluk hidup yang ditulis di kolom-1 Kolom-3 diisi dengan bentuk interaksi antara makhluk hidup yang namanya tertulis di kolom (1) dan kolom (2). Bentuk interaksi misalnya : pemangsa, mangsa, saling menguntungkan, saling mengganggu

Kolom-4 diisi dengan unsur alam yang mempengaruhi makhluk hidup yang tertulis di kolom-1, kanopi mangrove, perakaran mangrove, air laut, lumpur, dedaunan mangrove yang jatuh di air dll

Kolom-5 diisi dengan : tempat berteduh (dari pengaruh matahari atau kekuatan alam lainnya), atau tempat berlindung dari pengaruh pemangsa, tempat bertelur, tempat mencari makan, dll.

Kegiatan – 4 Mempelajari Interaksi Hutan Mangrove dengan Lingkungannya

- Membentuk kelompok diskusi : seperti kegiatan sebelumnya
- Pemimpin diskusi memberikan kesempatan kepada anggota kelompok untuk menyampaikan pengertian tentang ekosistem dan lingkungan
- Kelompok berdiskusi membahas ekosistem hutan mangrove dan mengidentifikasi lingkungan dari ekosistem hutan mangrove
- Pemimpin mengarahkan kelompok untuk bersama-sama mengisi form yang telah disediakan (form isian kegiatan-4)
- Pemimpin diskusi merencanakan kegiatan pengamatan interaksi hutan mangrove dengan lingkungannya
- Kelompok secara bersama melakukan pengamatan dan merevisi form isian sesuai hasil pengamatan. Anggota yang lebih paham menjelaskan kepada yang kurang memahami
- Kelompok berdiskusi membandingkan pengertian interaksi makhluk hidup dengan lingkungannya dalam ekosistem mangrove, dengan interaksi ekosistem hutan mangrove dengan lingkungannya
- Pemimpin diskusi dan setiap anggota kelompok meminta penjelasan dari orang yang dianggap lebih mengetahui interaksi makhluk dalam hutan mangrove. Siswa ditugaskan bertanya pada guru dan berdiskusi dengan teman

Format isian kegiatan- 4 : Mempelajari Interaksi Hutan Mangrove dengan Lingkungannya

Komponen lingkungan hutan mangrove	Bentuk pengaruh lingkungan terhadap hutan mangrove	Pengaruh hutan mangrove terhadap lingkungan
(1)	(2)	(3)
sungai	Memasok lumpur untuk pertumbuhan hutan mangrove dan anakan mangrove	
Pemukiman di pantai		Melindungi pemukiman dari pengaruh badai

Ket. : Isilah kolom (1), (2), dan (3) sesuai contoh di atas. Untuk setiap komponen lingkungan (kolom-1), pasangan data kolom (2) dan (3) boleh lebih dari satu

C. Jenis-jenis Hutan Mangrove

Tujuan Kegiatan Belajar

- *Mahasiswa dapat membedakan jenis hutan mangrove , penamaan ilmiah dan penamaan lokalnya*
- *Mahasiswa dapat mengidentifikasi jenis hutan mangrove di lapangan*

Kegiatan – 5 Mengenali Jenis Hutan Mangrove dan Penamaannya

- Membentuk kelompok diskusi : seperti kegiatan sebelumnya
- Pemimpin mengarahkan kelompok untuk mengidentifikasi jenis hutan mangrove dan penamaannya, menggunakan Gambar kanopi dan buah, dan gambar akar mangrove
- Kelompok berdiskusi membahas hasil identifikasi dan mengisinya dalam form isian kegiatan-5

Isian Kegiatan – 5 : Mengenali Jenis Hutan Mangrove dan Penamaannya

Nomor gambar (kanopi dan buah)	Nomor gambar (akar)	Nama ilmiah	Nama lokal	Ada di desa
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

Kegiatan – 6 Mengenal Pola Pertumbuhan dan Tempat Tumbuh Hutan Mangrove

- Pemimpin diskusi merencanakan kegiatan pengamatan di lapangan untuk : mengidentifikasi jenis hutan mangrove, urutan jenis mangrove bertumbuh (dari laut ke darat), dan substrat atau tempat bertumbuhnya jenis hutan mangrove
- Kelompok melakukan kegiatan lapangan dan mengisi format isian kegiatan-6
- Pemimpin diskusi mengajak kelompok untuk mendiskusikan kembali hasil identifikasi (format isian kegiatan -5 dan hasil pengamatan lapangan (format isian kegiatan-6).
- Sekretaris kelompok merapikan catatan diskusi dan format isian kegiatan-5 dan kegiatan-6 untuk didokumentasikan
- Pemimpin diskusi dan setiap anggota kelompok ditugasi meminta penjelasan dari orang yang dianggap lebih mengetahui jenis hutan mangrove dan ciri khasnya.

Format isian kegiatan - 6 : Mengenal Pola Pertumbuhan dan Tempat Tumbuh Hutan Mangrove

Nomor urutan pertumbuhan mangrove dari laut ke darat	Jenis hutan mangrove	Subtrat atau tempat bertumbuh jenis mangrove			
		Lumpur tebal	Lumpur tebal bercampur pasir	Pasir & sedikit lumpur	Pasir tak berlumpur
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1					
2					
3					
4					
5					
6					

Keterangan : Kolom (2) diisi dengan jenis mangrove yang ada di desa sendiri, sesuai hasil identifikasi pada form isian kegiatan-5

Kolom (3) s/d (6) diisi dengan tanda √ sesuai dengan hasil pengamatan. Satu jenis mangrove dapat saja bertumbuh pada dua kondisi substrat berbeda, Misalnya jenis mangrove Avicenia, dapat bertumbuh pada substrat : pasir dan sedikit lumpur, dan pada substrat pasir tak berlumpur, maka diisi tanda √ pada kolom (5) dan (6)

D. Fungsi Hutan Mangrove

Tujuan Kegiatan Belajar

- *Keluarga/masyarakat dapat memahami lebih luas dan mendalam tentang fungsi ekosistem hutan mangrove*
- *Keluarga/masyarakat dapat mengidentifikasi bagaimana interaksi hutan mangrove dengan lingkungan melalui kegiatan lapangan*

Kegiatan – 7 Mengenal lebih jauh fungsi hutan mangrove bagi ikan, hewan laut lainnya dan satwa

- Membentuk kelompok diskusi : seperti kegiatan sebelumnya
- Pemimpin diskusi memberikan arahan materi diskusi tentang fungsi hutan mangrove
- Pemimpin diskusi menunjuk seorang anggota kelompok untuk membacakan laporan kegiatan (format isian kegiatan-3, tentang interaksi makluk hidup dengan lingkungannya)
- Pemimpin diskusi dan anggota kelompok merencanakan kegiatan lapangan untuk mengamati fungsi hutan mangrove bagi ikan, hewan laut lainnya dan satwa
- Kelompok diskusi melakukan pengamatan keberadaan hewan laut dan satwa dalam hutan mangrove di desanya, dan mengisi format kegiatan-7a dan 7b

Format isian kegiatan – 7a : Fungsi hutan mangrove untuk ikan dan hewan laut lainnya

Jenis ikan/ hewan laut	Fungsi hutan mangrove bagi ikan & hewan laut lain				
	kawin	bertelur	pertumbuhan	Mencari makan	Berteduh/ berlindung
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)

Keterangan : Kolom (1) diisi dengan jenis ikan atau hewan laut yang ada dalam hutan mangrove di desa sendiri.

Kolom (2) s/d (6) diisi dengan tanda \surd sesuai hasil pengamatan. Fungsi hutan mangrove untuk satu jenis ikan atau hewan laut dapat lebih dari satu, sehingga dapat memberi tanda centang pada lebih dari satu kolom dari antara antara kolom (2) s/d (6)

Format isian kegiatan – 7b. Fungsi hutan mangrove untuk satwa

Jenis satwa	Fungsi hutan mangrove bagi satwa				
	kawin	bertelur	pertumbuhan	Mencari makan	Berteduh/ berlindung
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)

Jenis satwa	Fungsi hutan mangrove bagi satwa				
	kawin	bertelur	pertumbuhan	Mencari makan	Berteduh/ berlindung
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)

Keterangan : Kolom (1) diisi dengan jenis satwa yang ada dalam hutan mangrove di desa sendiri.

Kolom (2) s/d (6) diisi dengan tanda √ sesuai hasil pengamatan. Fungsi hutan mangrove untuk satu jenis jenis satwa dapat lebih dari satu, sehingga dapat memberi tanda centang pada lebih dari satu kolom dari antara antara kolom (2) s/d (6)

Kegiatan – 8 Mengenali lebih jauh fungsi hutan mangrove terhadap lingkungannya

- Pemimpin diskusi menunjuk seorang anggota kelompok untuk membacakan laporan kegiatan (format isian kegiatan-4, tentang interaksi hutan mangrove dengan lingkungannya)
- Pemimpin diskusi dan anggota kelompok merencanakan kegiatan lapangan untuk mengamati fungsi hutan mangrove terhadap lingkungannya

- Kelompok diskusi melakukan pengamatan dan mengisi format isian kegiatan-8
- Pemimpin diskusi mengajak kelompok untuk mendiskusikan kembali hasil pengamatan lapangan (format isian kegiatan-7a, 7b dan kegiatan-8).
- Sekretaris kelompok merapikan catatan diskusi dan format isian kegiatan-7a dan 7b dan kegiatan-8 untuk didokumentasikan
- Pemimpin diskusi dan setiap anggota kelompok bertugas meminta penjelasan dari orang yang dianggap lebih mengetahui fungsi hutan mangrove.

Format isian kegiatan – 8 : Mengenali lebih jauh fungsi hutan mangrove terhadap lingkungannya

Lingkungan hutan mangrove	Fungsi hutan mangrove	Kondisi terlihat di lapangan
(1)	(2)	(3)
Wilayah pantai		
Padang lamun dan terumbu karang		

Keterangan : kolom (2) diisi dengan fungsi-fungsi hutan mangrove terhadap komponen lingkungan hutan mangrove (wilayah pantai, padang lamun dan terumbu karang).

Kolom (3) diisi dengan gejala atau apa yang tampak di lapangan, berkaitan dengan fungsi hutan mangrove terhadap komponen lingkungan

E. Pemanfaatan Hutan Mangrove

Kegiatan – 9 Mengetahui berbagai bentuk pemanfaatan hutan mangrove

- Membentuk kelompok diskusi : seperti kegiatan sebelumnya
- Pemimpin diskusi memberikan arahan materi diskusi tentang bentuk pemanfaatan hutan mangrove
- Kelompok berdiskusi membahas berbagai bentuk pemanfaatan hutan mangrove, dan mengisi format isian kegiatan-9

Format isian kegiatan – 9 : Mengetahui berbagai bentuk pemanfaatan hutan mangrove

Bentuk pemanfaatan	Mangrove di desa sendiri			Mangrove di desa
	Sangat menguntungkan	kurang menguntungkan	Tidak menguntungkan	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

Keterangan :

Kolom (1) diisi dengan berbagai bentuk pemanfaatan area dan pohon mangrove.

Kolom (2) a/d (4) diisi dengan kemanfaatan yang diperoleh dari pemanfaatan hutan mangrove di desas sendiri. Kelompok memilih salah satu kategori kemanfaatan dengan memberi tanda pada kolom yang dianggap paling sesuai

Kolom (4) diisi dengan nama desa dimana anggota kelompok pernah melihat langsung atau melalui media massa, bentuk pemanfaatan (pada kolom (1)).

- Pemimpin diskusi mengarahkan kelompok untuk mendiskusikan bentuk pemanfaatan dari gambar-gambar berikut dan melengkapi form isian kegiatan-9

F. Bentuk Kerusakan Hutan Mangrove dan Penyebabnya

Kegiatan – 10 Mengetahui berbagai bentuk kerusakan hutan mangrove karena faktor alam

- Membentuk kelompok diskusi : seperti kegiatan sebelumnya
- Pemimpin diskusi memberikan arahan materi diskusi tentang identifikasi dan klasifikasi bentuk kerusakan hutan mangrove karena faktor alam
- Kelompok berdiskusi membahas kembali hasil diskusi yang tertulis dalam format isian kegiatan – 3 (*tentang interaksi mahluk hidup dengan lingkungan – dalam hutan mangrove*) dan format isian kegiatan-4 (*interaksi hutan mangrove dengan lingkungannya*)
- Kelompok merumuskan hasil diskusi dengan mengisi format isian kegiatan – 10

Format isian kegiatan – 10 Mengetahui berbagai bentuk kerusakan hutan mangrove karena faktor alam

Bentuk kerusakan	Sumber/penyebab kerusakan	Tingkat kerusakan & lokasinya
(1)	(2)	(3)
Penimbunan sampah menyebabkan gangguan pertumbuhan		
Pengikisan substrat & pengangkutan lumpur dan/atau pasir		
Lain-lain (sebutkan)		

Keterangan :

- 1 Kolom (1) diisi dengan data bentuk kerusakan hutan mangrove, baik yang ada di desa sendiri atau tempat lain, yang dilihat langsung atau diketahui melalui media massa atau sumber informasi lain
- 2 Kolom (2) diisi data sumber atau penyebab bentuk kerusakan yang ditulis pada kolom (1). Setiap bentuk kerusakan dapat disebabkan oleh lebih dari satu factor alam, dan masing-masing dituliskan berurutan pada baris dalam kolom (2)
- 3 Kolom (3) diisi dengan tingkat kerusakan yang disebabkan oleh factor yang tertulis pada kolom (2). Tingkat kerusakan dapat dikategorikan atas : berat, sedang hingga berat, ringan hingga sedang, dan ringan

Kegiatan – 11 Mengetahui berbagai bentuk kerusakan hutan mangrove karena pemanfaatan/ ulah manusia

- Membentuk kelompok diskusi : seperti kegiatan sebelumnya
- Pemimpin diskusi memberikan arahan materi diskusi tentang identifikasi dan klasifikasi bentuk kerusakan hutan mangrove karena ulah manusia
- Kelompok berdiskusi membahas kerusakan hutan mangrove karena ulah manusia, dan memasukan kesimpulan diskusi dalam format isian kegiatan-11

Format isian kegiatan – 11 Mengetahui berbagai bentuk kerusakan hutan mangrove karena pemanfaatan/ulah manusia

Bentuk kerusakan	Perbuatan yang menjadi penyebab	Tingkat kerusakan yang ditimbulkan & lokasinya
(1)	(2)	(3)
Kerusakan area hutan mangrove		
Kerusakan pohon mangrove dan gangguan pertumbuhannya		
Kerusakan substrat atau tempat bertumbuhnya hutan mangrove		

Keterangan :

- 1 Kolom (2) diisi data bentuk pemanfaatan atau perbuatan yang menjadi penyebab kerusakan yang ditulis pada kolom (1). Data pada kolom (2) adalah data bentuk pemanfaatan atau ulah manusia yang menyebabkan kerusakan hutan mangrove di desa sendiri atau tempat lain. Setiap bentuk kerusakan dapat disebabkan oleh lebih dari satu factor ulah manusia, dan masing-masing dituliskan berurutan pada baris dalam kolom (2)
- 2 Kolom (3) diisi dengan tingkat kerusakan yang disebabkan oleh factor yang tertulis pada kolom (2). Tingkat kerusakan dapat dikategorikan atas : berat, sedang hingga berat, ringan hingga sedang, dan ringan

Kegiatan – 12 Kegiatan lapangan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi kerusakan ekosistem mangrove

- Pemimpin diskusi merencanakan kegiatan pengamatan di lapangan untuk : mengidentifikasi bentuk kerusakan penyebab (faktor alam dan/atau manusia) dan tingkat kerusakan yang ditimbulkan
- Kelompok melakukan kegiatan lapangan, berdiskusi dan mengisi format isian kegiatan- 12
- Pemimpin diskusi mengajak kelompok untuk mendiskusikan kembali hasil pengamatan lapangan, dan menugaskan setiap anggota kelompok untuk berdiskusi atau mencari penjelasan dari orang yang dianggap lebih mengetahui masalah kerusakan hutan mangrove.

Format isian Kegiatan – 12 Kegiatan lapangan untuk mengamati kerusakan hutan mangrove (di desa sendiri) dan mengidentifikasi penyebabnya (factor alam atau ulah manusia)

Bentuk kerusakan	Penyebab kerusakan dan tingkat kerusakan			
	Ulah manusia	Tingkat kerusakan	Alam	Tingkat kerusakan
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

Keterangan

- 1 Kolom (1) diisi dengan bentuk kerusakan hutan mangrove yang teridentifikasi di hutan mangrove di desa sendiri
- 2 Kolom (3) diisi dengan tingkat kerusakan (pada kolom (1) yang disebabkan oleh manusia
- 3 Kolom (5) diisi dengan tingkat kerusakan yang disebabkan oleh factor alam

Data tingkat kerusakan yang diisi dalam kolom (3) dan (5) dapat dikategorikan atas : berat, sedang hingga berat, ringan hingga sedang dan ringan.

2. DIFUSI TERMAL DALAM EKOSISTEM HUTAN



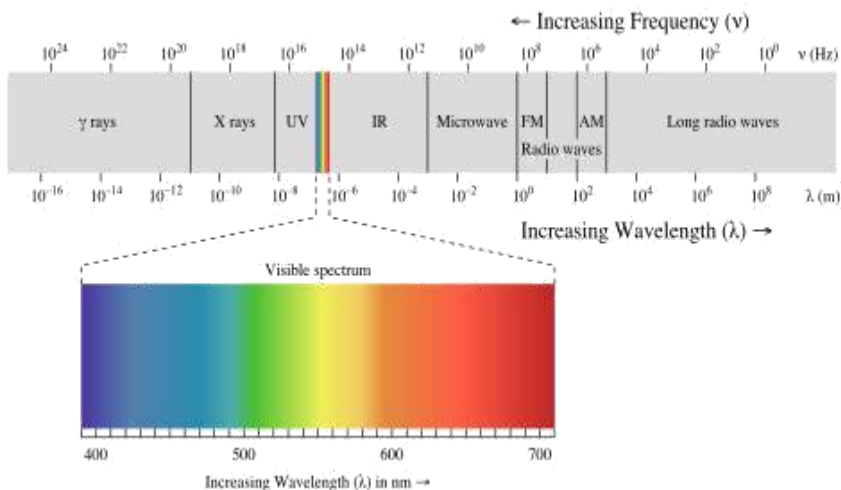
© mongabay.com

2.1. Radiasi Matahari dan Emisi Termal

2.1.1. Spektrum Radiasi Matahari

Matahari merupakan sumber energy utama kehidupan dan seluruh aktivitas makhluk hidup yang ada di bumi. Energi radiasi matahari memiliki sifat sebagai gelombang sekaligus sebagai partikel, sehingga dikenal sebagai gelombang partikel. Sifat radiasi matahari sebagai gelombang dibuktikan dengan fenomena seperti pembiasan, pemantulan dll. Sifat radiasi sebagai partikel antara lain dibuktikan dengan efek fotolistrik.

Radiasi matahari terbentang dalam spectrum gelombang elektromagnetik dari frekwensi tertinggi (panjang gelombang terpendek) yakni sinar gamma hingga gelombang radio yang memiliki frekwensi terendah (panjang gelombang terpanjang).



Gambar-2.1. Spektrum radiasi elektromagnetik (sumber: Wikipedia)

Gambar-2.1 memperlihatkan spectrum gelombang elektromagnetik dari frekwensi terendah atau panjang gelombang terpanjang pada bagian paling kanan hingga frekwensi tertinggi atau panjang gelombang terpendek pada bagian paling kiri. Hubungan antara panjang gelombang dengan frekwensi radiasi elektromagnetik dinyatakan dalam persamaan:

$$c = \nu \cdot \lambda \dots\dots\dots(2-1)$$

dimana c adalah kecepatan radiasi elektromagnetik, ν adalah frekwensi dan λ adalah panjang gelombang radiasi elektromagnetik. Kecepatan radiasi elektromagnetik atau lebih dikenal sebagai kecepatan cahaya adalah 3×10^8 meter perdetik.

Spectrum gelombang radio adalah bagian dari spectrum gelombang elektromagnetik yang terletak pada frekwensi dan gelombang radio seperti yang digunakan dalam radio sehari-hari. Spektrum gelombang elektromagnetik yang frekwensinya sedikit di atas gelombang radio adalah gelombang mikro, yang biasanya digunakan untuk radar. Di sebelah kiri spectrum gelombang mikro terletak spectrum inframerah. Spektrum tampak mata (*visible spectrum*) atau lazim disebut spectrum cahaya merupakan bagian kecil dari spectrum gelombang elektromagnetik yang terletak antara spectrum inframerah dan spectrum ultraviolet. Spektrum ultraviolet memiliki frekwensi lebih tinggi dan panjang gelombang lebih pendek dari spectrum cahaya. Di sebelah kiri dengan frekwensi lebih tinggi dan panjang gelombang lebih pendek dari gelombang atau radiasi ultraviolet terdapat sinar-X. Frekwensi maupun panjang gelombang radiasi sinar-X ini sama dengan yang digunakan dalam alat Rontsen. Gelombang elektromagnetik yang memiliki frekwensi tertinggi dan panjang gelombang terpendek adalah sinar gamma, yang memiliki sifat sama dengan sinar gamma yang dipancarkan oleh zat radioaktif.

2.1.2. Konsep Benda Hitam dan Hukum Radiasi

Benda hitam (*black-body*) adalah definisi fisika tentang sebuah obyek yang mengemisi sekaligus menyerap energy secara sempurna. Obyek dimaksud tidak tampak hitam, namun berperilaku sebagai pemancar dan penyerap energy yang sempurna. Matahari dan permukaan bumi didefinisikan sebagai benda hitam. Hukum utama yang berlaku dalam radiasi benda hitam adalah hokum radiasi Plank (*Plank Radiation Law*), yang menyatakan bahwa pada suhu tertentu, intensitas radiasi yang diemisi atau dipancarkan oleh satu satuan luas dari benda hitam adalah fungsi dari panjang gelombang. Secara matematis, hokum radiasi Plank ini dinyatakan sebagai berikut:

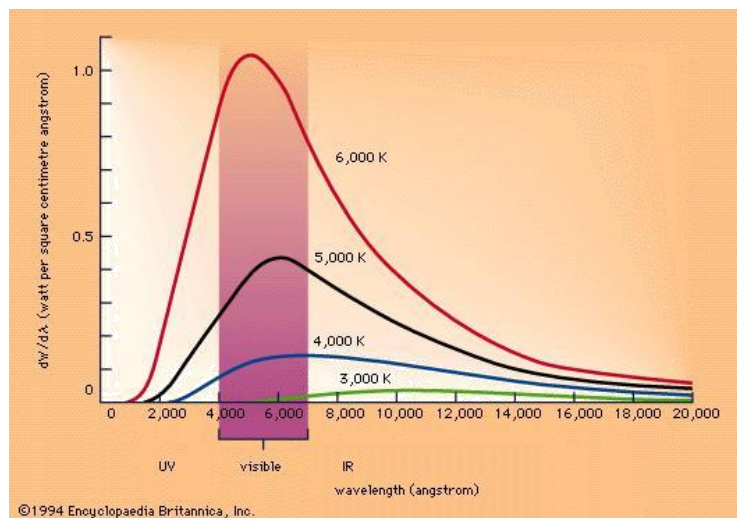
$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} - \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \quad (2-2a)$$

dimana B adalah spectrum radiasi, T adalah suhu mutlak benda hitam, k_B adalah tetapan Boltzmann, h adalah tetapan Plank, dan c adalah kecepatan cahaya. Berdasarkan hubungan antara panjang gelombang dengan frekwensi radiasi elektromagnetik (persamaan 2-1), maka bentuk hukum radiasi Plank sebagai fungsi frekwensi adalah:

$$B_{\nu}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} - \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} \quad (2-2b)$$

dimana ν adalah frekwensi radiasi benda hitam

Fungsi spectrum radiasi yang ditunjukkan oleh persamaan (2-2a) dan (2-2b) merupakan fungsi malar (kontinu) untuk setiap harga suhu mutlak T. Artinya untuk setiap harga T, kurva radiasi benda hitam meliputi seluruh rentang frekwensi atau panjang gelombang radiasi elektromagnetik seperti ditunjukkan pada Gambar-2.1. Emisi radiasi oleh benda hitam merupakan emisi kontinum (*continuum emission*). Kurva spectrum radiasi benda hitam disajikan pada Gambar-2.2.



Gambar-2.2. Kurva radiasi benda hitam (sumber: Encyclopedia Britannica).

Gambar-2.2 memperlihatkan empat kurva (kontinu) radiasi benda hitam, masing-masing untuk suhu benda hitam: 6000 K, 5000 K, 4000 K, dan 3000 K. Puncak radiasi benda hitam untuk masing-masing harga T tidak terjadi pada panjang gelombang yang sama. Gambar-2.2 memperlihatkan, semakin tinggi suhu benda hitam, letak puncak radiasi semakin ke kiri. Hubungan antara panjang gelombang dimana tercapai puncak radiasi dengan suhu benda hitam yang memancarkan radiasi tersebut adalah:

$$\lambda = 3 \times 10^7 / T \dots\dots\dots(2-3)$$

Dalam persamaan (2-3) λ dinyatakan dalam Angstrom. Persamaan ini dikenal sebagai hukum Wien. Persamaan (2-3) menunjukkan bahwa semakin besar harga T, harga λ semakin kecil. Radiasi matahari yang suhunya 6000 K puncaknya terletak pada panjang gelombang 5000 Angstrom atau 5×10^{-7} meter (daerah tampak mata). Puncak radiasi permukaan bumi yang suhunya sekitar 300 K terletak pada panjang gelombang 100.000 Angstrom atau 0,00001 meter (spectrum inframerah).

Besarnya energy radiasi dinyatakan dengan persamaan:

$$E = s.T^4 \dots\dots\dots(2-4)$$

Persamaan (2-4) dikenal sebagai hukum Stefan-Boltzmaan. E adalah energy total radiasi, s adalah tetapan Boltzmann yang harganya $s = 5.67 \times 10^{-8}$ Joule/(m²sec K⁴). Persamaan (2-4) menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu benda hitam total energy yang dipancarkan semakin besar. Total energy yang dipancarkan oleh benda hitam untuk masing-masing suhu 6000 K, 5000 K, 4000 K, dan 3000 K pada Gambar-2.2 adalah luas bidang di bawah kurva radiasi untuk masing-masing suhu. Masing-masing spectrum atau tipe gelombang (gelombang radio, gelombang mikro dst.) memiliki puncak radiasi tertentu tapi berbeda antar spectrum. Masing-masing spectrum memiliki total energy radiasi yang tertentu dan berbeda antar spectrum. Tabel-2.1 menunjukkan tipe gelombang, panjang gelombang radiasi, frekwensi radiasi dan total energy radiasi benda hitam.

Tabel-2.1 Panjang gelombang, frekwensi dan energy radiasi elektromagnetik

Tipe gelombang	Panjang gelombang (meter)	Frequency (Hertz)	Energy gelombang (Joule)
Gelombang radio	> 0.1	$< 3 \times 10^9$	$< 2 \times 10^{-24}$
Gelombang mikro	$10^{-3} - 0.1$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{11}$	$2 \times 10^{-24} - 2 \times 10^{-22}$
Radiasi inframerah	$7 \times 10^{-7} - 10^{-3}$	$3 \times 10^{11} - 4 \times 10^{14}$	$2 \times 10^{-22} - 3 \times 10^{-19}$
<u>gelombang</u> cahaya	$4 \times 10^{-7} - 7 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$3 \times 10^{-19} - 5 \times 10^{-19}$
Sinar Ultraviolet	$10^{-8} - 4 \times 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}$	$5 \times 10^{-19} - 2 \times 10^{-17}$
Sinar-X	$10^{-11} - 10^{-8}$	$3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}$	$2 \times 10^{-17} - 2 \times 10^{-14}$
Sinar Gamma	$< 10^{-11}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 2 \times 10^{-14}$

2.1.3. Keseimbangan Termal dalam Alam

Radiasi matahari yang menembus atmosfer dan mencapai permukaan bumi memiliki puncak radiasi pada spectrum tampak mata atau spectrum cahaya. Energi radiasi terbesar pada spectrum tampak mata ini, ketika jatuh ke permukaan bumi sebagiannya dipantulkan dan sebagiannya di serap. Bagian energy radiasi yang dipantulkan oleh permukaan bumi di sebut albedo. Tingkat pantulan energy atau albedo bervariasi menurut panjang gelombang radiasi dalam spectrum elektromagnetik. Albedo berkurang dengan meningkatnya absorpsi energy radiasi oleh permukaan bumi (Rosenberg *et al.*, 1985). Albedo sebagian diserap oleh partikel udara dan meningkatkan suhu udara. Kuantitas albedo selain berbeda antar permukaan, juga berubah dari waktu ke waktu sepanjang hari karena perubahan elevasi matahari. Bagian energy radiasi yang di serap permukaan bumi digunakan untuk

proses fisis dan biologis dan sebagiannya juga meningkatkan suhu obyek atau material di permukaan bumi. Hubungan antara sumber energy dengan energy yang diterima permukaan mengikuti persamaan kesetimbangan energi

$$R_n + H + S + LE + PS + M = 0 \dots\dots\dots(2-5)$$

dimana

R_n = net radiation,

S = fluks panas permukaan (tanah, air,),

H = fluks panas sensible (*sensible heat fluks*),

LE = adalah fluks panas laten (*latent heat fluks*),

PS dan M = masing-masing energi untuk fotosintesa dan bagian dari energi yang dirubah kebentuk lainnya (Campbell, 1977).

Bagian energi yang penting untuk mendeskripsikan transfer energy antar komponen ekosistem adalah panas sensible. Panas sensible ialah bagian radiasi yang digunakan untuk menaikkan suhu benda atau obyek, dan dapat diukur dengan termometer. Pada tingkatan suhu tertentu (bergantung sifat bahan atau materi dan kondisi lingkungan), bahan atau obyek dipermukaan bumi akan meradiasi emisi termal dan membentuk fluks permukaan. Aliran energy antara permukaan dengan udara yang dikenal sebagai fluks panas sensible (fluks panas permukaan), dibedakan atas dua macam aliran energy yakni : (1) aliran tertekan (*forced convection*) yakni aliran yang dipengaruhi gaya mekanik, gesekan fluida, atau gaya eksternal seperti angin, (2) aliran bebas (*free convection*) ialah aliran energy yang semata-mata disebabkan oleh perbedaan suhu fluida (udara), misalnya terjadi pada daerah batas udara yang memiliki suhu tinggi dengan suhu rendah. Kedua kategori aliran energy ini penting dalam kajian iklim mikro (Rosenberg *et al.*, 1985, Monteith, 1973). Angin berperan penting dalam transfer panas sensible dari lingkungan yang lebih panas ke lingkungan yang lebih dingin.

Fluks panas sensible didefinisikan sebagai gradient temperature dibagi tahanan udara (*aerial resistance*) pada aliran panas sensible atau :

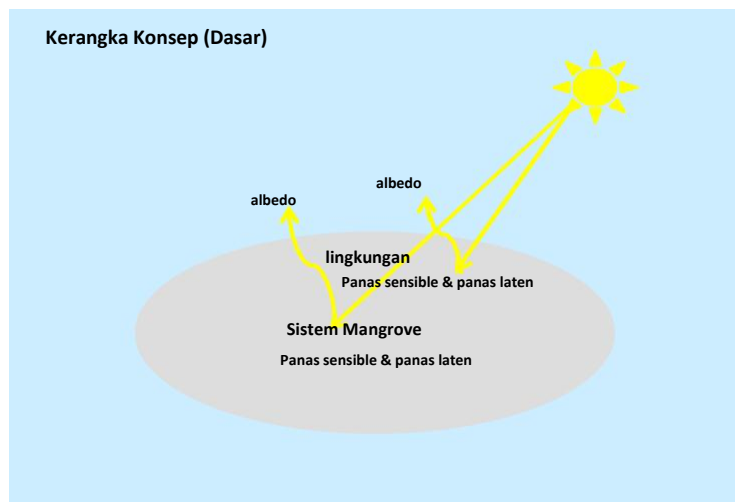
$$H = \rho_a C_p (T_a - T_s) / r_a \dots\dots\dots(2-6)$$

dimana,

H = fluks panas,
 ρ_a = kerapatan udara,
 C_p = panas jenis udara pada tekanan konstan,
 T_a dan T_s = masing-masing suhu udara dan permukaan, r_a = resistansi pada aliran panas sensible.

Persamaan menunjukkan bahwa fluks panas sensible akan meningkat jika resistansi udara berkurang. Resistansi udara berkurang jika kerapatan udara berkurang (udara menjadi lebih renggang karena menjadi lebih panas) (Rosenberg *et al.*, 1985, Monteith, 1973)

Energi radiasi matahari yang diterima permukaan serta bagian energy yang dipantulkan (albedo), dan yang diserap (panas sensible dan panas laten) disajikan secara skematis pada Gambar-2.3



Gambar-2.3. Skema energy radiasi diterima, dipantulkan dan diserap

2.1.4. Emisi Thermal dan Fenomena Pemanasan Global

a. Emisi termal oleh permukaan bumi

Absorpsi radiasi matahari yang puncaknya pada spectrum tampak mata oleh permukaan bumi menyebabkan kenaikan suhu permukaan bumi, atau obyek dan materi yang ada di permukaan bumi. Pada saat suhu tanah misalnya lebih tinggi dari suhu udara, maka tanah akan mengemisi radiasi termal yang puncak radiasinya pada spectrum inframerah termal. Jadi obyek atau materi

yang ada dipermukaan bumi berperan sebagai penyerap energy radiasi matahari atau energy dari komponen lain di permukaan bumi, sekaligus sebagai emitter ke ruang atau materi lain yang ada di sekitarnya. Sekali lagi ditekankan disini bahwa emisi radiasi termal antar komponen system di permukaan bumi radiasi puncaknya terletak pada spectrum inframerah termal. Panjang gelombang spectrum inframerah termal lebih panjang disbanding panjang gelombang radiasi tampak mata yang merupakan puncak radiasi matahari. Radiasi oleh materi dipermukaan bumi sering disebut radiasi gelombang panjang, sedangkan radiasi sinar matahari sering disebut radiasi gelombang pendek.

Permukaan bumi dipandang sebagai benda hitam yang meradiasi termal dengan kuantitas seperti pada persamaan (2-4). Kuantitas energy yang diemisi bergantung pada suhu benda. Untuk obyek atau material di permukaan bumi dengan suhu mutlak berkisar 300 K, frekwensi radiasi dan panjang gelombang serta energy radiasinya berkisar pada kuantitas yang diberikan pada Tabel-2.1 (untuk tipe gelombang: radiasi inframerah). Perbedaan konduktivitas dan difusivitas material dipermukaan bumi, perbedaan posiosi permukaan terhadap arah datangnya radiasi matahari, kekasaran permukaan dll., menyebabkan albedo dan panas yang diserap masing-masing obyek atau materi dipermukaan bumi berbeda. Perbedaan ini selanjutnya menyebabkan emisi radiasi termal oleh obyek dan materi dipermukaan bumi berbeda. Perbedaan kondisi termal menyebabkan difusi termal antar obyek atau materi di permukaan bumi.

b. Pemanasan global

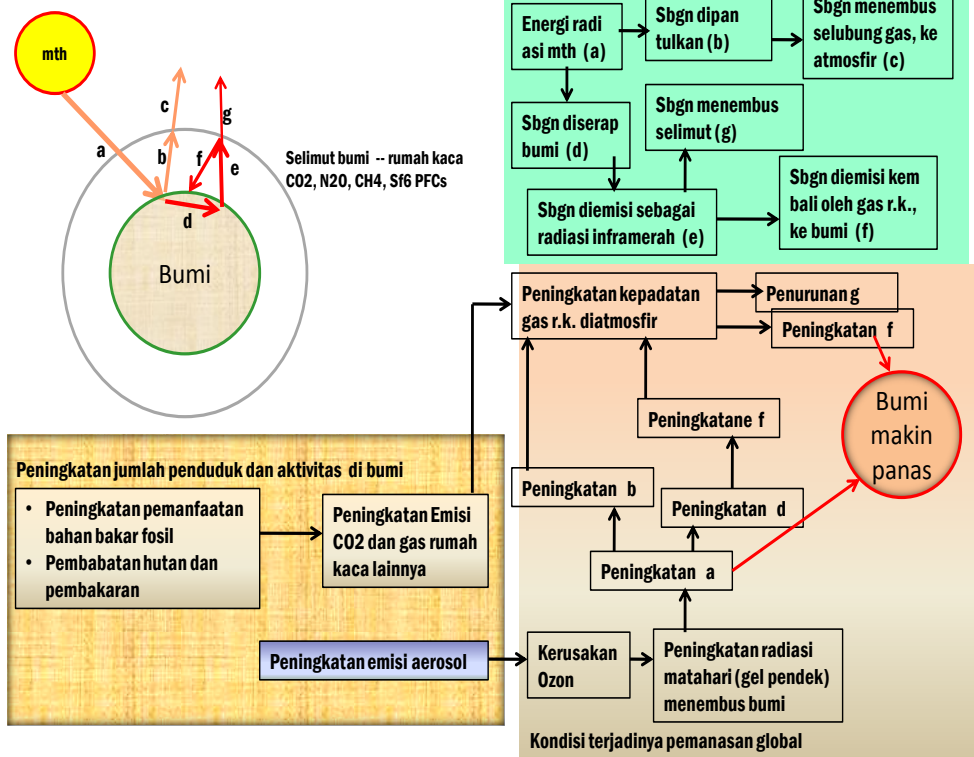
Fenomena pemanasan global (*global warming*) menjadi isu sangat hangat dalam beberapa tahun terakhir. Gejala terjadinya pemanasan global pertama kali diungkapkan oleh Svante Arrhenius, ilmuwan Swedia, pada tahun 1894. Pada intinya ia menyatakan bahwa karbon dioksida (CO₂) merupakan unsur terpenting yang mengendalikan suhu bumi. Penggunaan bahan bakar fosil yang berlebihan akan menjadi sumber peningkatan CO₂ yang berdampak pada kenaikan suhu bumi.

Fenomena pemanasan global terjadi karena dua sebab, yakni kerusakan ozon yang menyebabkan peningkatan intensitas radias matahari (tampak mata) masuk ke bumi dan peningkatan konsentasi gas rumah kaca yang meningkatkan pemantulan radiasi termal yang diemisi bumi. Penumpukan gas polutan yang disebut gas rumah kaca, merupakan selubung gas alami yang pada konsentrasi tertentu berfungsi menjaga bumi tetap hangat dan

nyaman dihuni. Gas rumah kaca diantaranya adalah karbondioksida (CO₂), dinitroksida (N₂O), metana (CH₄), sulfur heksafluorida (Sf₆) dan perfluorokarbon (PFCs). Namun meningkatnya konsentrasi gas CO₂ merupakan penyebab utama terjadinya pemanasan global yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil pada kegiatan industri, transportasi, pembakaran hutan dan perubahan tata guna lahan. Kadar CO₂ di atmosfer 200 tahun lalu sekitar 280 ppm, dan saat ini telah mencapai 383 ppm. Jika kondisi ini terus berlangsung menurut Tim Flanneri dalam bukunya *We Are The Weather Makers* (2006), kadar CO₂ akan mencapai 560 ppm. Pada saat ini temperatur udara akan meningkat sampai 4,5⁰ C, dan air laut naik sampai 90 cm (Polii, 2009).

Lapisan ozon di atmosfer berfungsi untuk mereduksi intensitas radiasi matahari pada gelombang pendek untuk mencapai bumi. Dalam keadaan normal, intensitas radiasi matahari yang mencapai bumi digunakan untuk berbagai proses kehidupan dan proses fisis seperti siklus air, pemanasan bumi dll. Penipisan atau kerusakan lapisan ozon (O₃) pada bagian tertentu di atmosfer sebagai akibat penggunaan aerosol yang berlebihan, meningkatkan intensitas radiasi gelombang pendek yang mencapai bumi. Semakin tipis ozon maka semakin leluasa radiasi gelombang pendek matahari memasuki bumi. Peningkatan radiasi matahari yang diterima bumi menyebabkan perubahan kesetimbangan termal yang ditunjukkan dalam persamaan (1). Kapasitas medium, bahan, unsur dan organisme di bumi untuk memanfaatkan peningkatan energi masuk, menyebabkan peningkatan panas permukaan dan panas sensibel. Peningkatan panas permukaan dan panas sensibel antara lain berdampak pada mencairnya es di kutub dan peningkatan emisi radiasi termal oleh permukaan bumi. Emisi radiasi termal ini adalah radiasi yang puncaknya berada pada panjang gelombang inframerah termal. Emisi radiasi termal oleh permukaan bumi ini memiliki daya tembus yang rendah dibanding radiasi sinar datang (gelombang pendek). Ketika panas termal ini mencapai selubung gas rumah kaca, sebagian besar energi ini terbandung; sebagian energi ini dipantulkan kembali kebumi sebagai radiasi termal dan diserap dan diemisi kembali sebagai radiasi termal ke bumi. Akibatnya pemanasan permukaan bumi terjadi secara berganda. Secara skematis, fenomena pemanasan global diperlihatkan pada Gambar-2.4.

Bagaimana terjadinya pemanasan global ?



Gambar-2.4. Skema terjadinya pemanasan global (dikembangkan dari Schahczensky and Hill, 2009)

Kotak berwarna biru menunjukkan kondisi radiasi dan suhu bumi yang masih normal. Pada keadaan normal (sebelum terjadi peningkatan pemanasan) radiasi matahari yang puncaknya pada spektrum tampak mata jatuh kepermukaan bumi, sebagiannya di pantulkan dan sebagiannya diserap oleh permukaan bumi. Energi yang dipantulkan ke atmosfer (dalam spektrum tampak mata) sebagian diserap partikel atmosfer dan sebagiannya diteruskan, menembus lapisan troposfir dan stratatosfir. Sebagian energi radiasi tampak mata yang jatuh kepermukaan bumi diserap dan diemis kembali oleh bumi ke angkasa dalam spektrum radiasi inframerah, karena bumi memiliki temperatur sekitar 300^oK.

Peningkatan produksi gas (aerosol) yang menghancurkan ozon, telah menyebabkan peningkatan intensitas radiasi matahari yang masuk ke bumi.

Jika kerusakan ozon semakin parah maka radiasi ultraviolet dengan frekwensi yang lebih tinggi (gelombang pendek) akan semakin banyak masuk ke bumi. Peningkatan kuantitas energi masuk meningkatkan kuanititas energi yang diserap dan diemisi kembali oleh bumi ke atmosfer. Peningkatan produksi gas (CO₂, N₂O, CH₄, Sf₆, PFCs) meningkatkan konsentrasi gas tersebut di udara sehingga meningkatkan kuantitas energi yang diemisi kembali oleh gas rumah kaca ke bumi. Peningkatan kuantitas energi yang diemisi kembali oleh gas rumah kaca ke bumi menyebabkan peningkatan suhu permukaan bumi (fenomena pemanasan global). Emisi karbon menjadi penyebab terbesar peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Di banyak Negara berkembang, emisi karbon dioksida disebabkan oleh pembakaran hutan. Perbandingan emisi karbon dan faktor penyebabnya antara Indonesia dengan negara lainnya sebagai berikut :

- Emisi karbon di AS 20,01 ton per tahun, Australia 19,36, Kanada 18,4, Jepang 9,37, Cina, 3,6, Brasil, 1,83, **Indonesia** 1,4 (sebagian terbesar berasal dari kebakaran hutan), India 1,02 dan Bangladesh 0,27.
- Hasil penelitian Wetlands International and Defl Hydraulics (2007) Belanda, menempatkan Indonesia sebagai penyumbang ketiga terbesar emisi gas CO₂ setelah Amerika Serikat (6.300 MtCO₂e) dan Cina (5.000 MtCO₂e). Sementara **Indonesia** menyumbang sekitar 3000 MtCO₂e.
- **Indonesia** menyumbang sepertiga dari 20% emisi global yg berasal dari deforestasi. (sumber: Polii, 2009)

Sumber-sumber emisi gas rumah kaca di Indoensia adalah:

- Deforestrasi dan konservasi lahan yang menyumbang sekitar 85% dari total emisi tahunan rumah kaca. Penggundulan hutan, degradasi lahan gambut dan kebakaran hutan menjadi penyumbang terbesar.
- Sektor energi (industri, pembangkit listrik, transportasi) yang menyumbang sekitar 10% walaupun nilainya jauh lebih kecil tetapi menunjukkan pertumbuhan yang signifikan.
- Pertanian, sebagian besar dari produksi padi yang menyumbang 4%.
- Persampahan, yang meskipun kecil sebesar 1% tetapi menjadi penghasil emisi terbesar keenam di sektor sampah dunia. (sumber: Polii, 2009).

Data di atas menunjukkan bahwa pembakaran/kebakaran hutan di Indonesia merupakan faktor penyebab yang serius dampaknya terhadap pemanasan global. Upaya dan pemikiran-pemikiran untuk pengendalian dampak lingkungan mulai di lakukan pada tingkat local maupun global. Gagasan perdagangan karbon (*carbon trade*) gencar dilakukan, untuk mengendalikan

perombakan hutan terutama di wilayah tropis termasuk Indonesia. Gagasan perdagangan karbon ini adalah pemberian kompensasi oleh Negara industri yang banyak memproduksi karbon di udara kepada Negara berkembang yang memiliki hutan untuk tetap merawatnya sebagai medium yang menyerap karbon. Berdasarkan hasil penelitian, hutan mangrove, diyakini para pakar memiliki kapasitas menyerap karbon yang sangat tinggi. Saat ini pelestarian dan perlindungan hutan mangrove menjadi agenda internasional, nasional dan local.

Masalah lingkungan dan dampak potensial pemanasan global di Indonesia, menurut *Global Fluid Dynamic* dan *Goddart Internasional Space Study*, adalah:

1. Diperkirakan suhu udara di Indonesia akan meningkat 2 hingga 4,2 derajat celcius sampai tahun 2050-2070. Saat ini mulai terlihat beberapa fenomena yang menunjukkan terjadinya imbas pemanasan global di Indonesia, diantaranya (a) makin menipis salju yang dulu menyelimuti puncak pegunungan Jayawijaya, Papua, (b) temperatur udara beberapa kota seperti Jakarta, Medan, Denpasar mulai meningkat pada kisaran 0,2 sampai 3 derajat celcius, (c) curah hujan yang lebih banyak sementara musim kemarau lebih panjang, (d) sekitar 20 pulau kecil hampir tenggelam karena kenaikan air permukaan laut yang sekitar 0,5 cm per tahun, (e) krisis air mulai terjadi.
2. Dalam jangka panjang Indonesia akan menghadapi beberapa kondisi yang kritis diantaranya karena memiliki garis pantai yang sangat panjang, yang rentan terhadap dampak kenaikan permukaan air laut. Ratusan pulau di Nusantara antara lain Pulau Miangas di Kabupaten Talaud dikhawatirkan akan tenggelam.
3. Kekacauan iklim akan berdampak pada perubahan musim sehingga ancaman kelaparan akibat kegagalan panen juga makin nyata. Di lain pihak ketergantungan bahan bakar fosil di Indonesia makin meningkat. Menurut prediksi Badan Energi Internasional (2007), ketergantungan Indonesia pada bahan bakar fosil meningkat dari 69% (2002) menjadi 82% (2006). Upaya pengembangan sumber energi ramah lingkungan masih terkendala dan minimnya insentif.
4. Di perkotaan timbunan sampah semakin meningkat yang berpeluang meningkatnya emisi gas karbon dan gas metan akibat kurang terkelolanya tempat pengolahan akhir (TPA) sampah. Seluruh TPA masih mempraktekkan sistem *open dumping*. Praktek 3 R (*reuse, reduce,*

recycle) yang dapat berpotensi mengurangi timbunan sampah masih belum mendapat perhatian serius pemerintah.

Rangkuman

- Spektrum radiasi matahari atau spectrum radiasi elektromagnetik meliputi: gelombang radio/televise, gelombang mikro, gelombang radiasi inframerah, radiasi tampak mata, radiasi ultra-violet, sinar-x dan sinar gamma, dengan panjang gelombang dan frekuensi yang berbeda
- Puncak radiasi matahari mencapai bumi berada pada frekuensi atau panjang gelombang tampak mata atau cahaya, artinya intensitas radiasi maksimum yang diterima permukaan bumi berada dalam frekuensi radiasi tampak mata. Intensitas radiasi spectrum lainnya lebih rendah.
- Radiasi matahari yang jatuh ke permukaan bumi dipantulkan sebagai albedo dan diserap menjadi panas latent dan panas sensible
- Fenomena pemanasan global disebabkan oleh peningkatan intensitas radiasi matahari yang mencapai bumi (pada spectrum tampak mata dan melebar hingga spectrum dengan frekuensi lebih tinggi seperti ultra-violet) dan karena peningkatan konsentrasi gas rumah kaca yang mengemisi balik radiasi termal yang diemisikan permukaan bumi

Tugas (kelompok)

1. Berikanlah dua contoh untuk masing-masing tipe gelombang elektromagnetik tentang kemanfaatan/pemanfaatannya dalam kehidupan sehari-hari. Jelaskan apakah gelombang radiasi tersebut menggunakan radiasi matahari atau dari sumber buatan. Untuk sumber radiasi buatan, jelaskan frekuensi dan panjang gelombang radiasi.
2. Jelaskan factor-faktor yang mempengaruhi intensitas radiasi matahari jatuh ke bumi, dan bagaimana perubahan intensitas radiasi tersebut ke depan
5. Jelaskan proses pemanasan permukaan bumi dan perbedaan panas antar objek atau materi yang ada di permukaan bumi. Jelaskan mengapa pada malam hari udara mula-mula terasa panas kemudian menjadi dingin.
6. Gambarkan skema dan jelaskan fenomena pemanasan global. Apa yang menjadi penyebab pemanasan global dan cara pengendaliannya
7. Buktikan bahwa persamaan (2a) dan (2b) adalah persamaan yang sama tapi dinyatakan dalam fungsi panjang gelombang dan frekuensi
8. Buktikan dan jelaskan bahwa energy radiasi yang frekuensinya tinggi, lebih besar dari energy radiasi pada frekuensi rendah. Jelaskan

mengapa lebih berbahaya berada dekat alat Rontgen dibanding berada dekat televisi

2.2. Difusi Termal dalam Ekosistem Hutan

2.2.1. Konduksi dan Difusi Termal

Konduksi termal (dan difusi termal) adalah perpindahan energy panas atau energy termal dari bagian materi yang suhunya lebih tinggi ke bagian yang suhunya lebih rendah. Konduksi termal mendeskripsikan perindahan energy dalam keadaan tunak (*steady state*) sedangkan difusi termal mendeskripsikan aliran fluks termal dalam keadaan tak tunak (*unsteady state*). Difusi termal dapat juga berlangsung antara dua materi atau bahan berbeda yang terletak berdampingan, tidak terisolasi satu sama lain. Difusi termal banyak dibahas dalam kajian fisika lingkungan untuk mendeskripsikan perpindahan energy termal antara ekosistem hutan dengan lingkungan atau antar matriks/ tambalan (*patch*) dalam satu ekosistem hutan.

Berdasarkan sifat perpindahan energy termal, difusi termal dibedakan atas difusi bebas (*free diffusion*) atau difusi tak tertekan (*unforced diffusion*) dan difusi tertekan (*forced diffusion*). Difusi bebas adalah aliran energy termal dari bagian materi atau bahan yang suhunya lebih tinggi bagian yang suhunya lebih rendah, tanpa disertai perindahan partikel. Difusi ini terjadi karena vibrasi partikel yang suhunya lebih tinggi dan menumbuk partikel terdekat yang suhunya lebih rendah, sehingga amplitudo vibrasi partikel kedua ini bertambah. Amplitudo partikel kedua bertambah karena partikel tersebut telah menerima energy panas dari partikel pertama. Partikel kedua menumbuk partikel yang lebih dingin dan memindahkan sebagian energy pada partikel ketiga dst. Perpindahan panas dari tempat terbuka ke dalam hutan dalam keadaan tanpa angin (atau kecepatan angin sangat rendah) merupakan difusi termal tak tertekan. Difusi termal tertekan disertai perpindahan partikel yang suhunya lebih tinggi ke posisi yang sebelumnya memiliki suhu lebih rendah. Difusi termal pada fluida melalui proses konveksi merupakan contoh difusi termal tertekan. Perpindahan partikel atau molekul dalam bahan atau medium disebabkan oleh tekanan yang muncul karena pengaruh pemanasan atau pengaruh gaya luar pada materi.

Ada dua parameter fisis penting berkaitan dengan sifat bahan atau materi dalam memindahkan energy termal, yakni konduktivitas termal (*thermal conductivity*) dan diffusivitas termal (*thermal diffusivity*). Kedua parameter ini secara fisis mencirikan kapasitas bahan atau materi dalam memindahkan energy termal namun digunakan pada kondisi aliran termal yang berbeda. Dalam Webster's Online Dictionary, dikemukakan bahwa untuk mendeskripsikan sifat bahan atau materi dalam mengalirkan panas pada keadaan tunak (*steady state*) digunakan parameter konduktivitas termal.

Untuk mendeskripsikan sifat bahan dalam mengalirkan panas pada keadaan transien digunakan parameter difusivitas termal. Ada beragam definisi konduktivitas termal dan difusivitas termal, bergantung pada bidang penggunaannya. Definisi konduktivitas termal antara lain:

- a. Di bidang penerbangan: konduktivitas termal adalah sifat fisis intrinsik dari bahan yang mencirikan kapasitasnya untuk menerima panas sebagai akibat gerakan molekul. Konduktivitas termal memiliki rumus yang berkaitan dengan konduksi panas dalam transfer momentum. Rumusan konduktivitas panas berdasarkan hukum Newton tentang pendinginan: $H = -k (T/N)$, dimana k adalah konduktivitas panas, H adalah laju konduksi panas melalui permukaan persatuan luas dan persatuan waktu; dan T/N adalah gradient suhu tegak lurus terhadap permukaan. Di bidang penerbangan, konduktivitas termal sering dikenal dengan istilah konduktivitas panas (*heat conductivity*), atau koefisien konduktivitas termal, atau koefisien konduktivitas termal. Definisi lain yang juga digunakan dalam bidang penerbangan adalah: laju transfer panas dari titik ke titik dalam tanah.
- b. Di bidang pertambangan: konduktivitas termal adalah laju transfer panas secara konduksi, melalui satuan-satuan luas tiap lapisan tanah yang suhunya berbeda. Definisi lain yang digunakan di bidang pertambangan adalah: kemampuan material dalam menghantar panas. Konduktivitas termal batuan berada dalam rentang 3 sampai 15 $\text{mcal/cm/sec/}^{\circ}\text{C}$ atau 12.6 sampai 62.8 $\text{kJ/cm/sec/}^{\circ}\text{C}$.
- c. Di bidang fisika: adalah tingkat kemampuan bahan mentransmisi panas. Definisi ini merupakan definisi dasar yang digunakan dalam fisika.
- d. Di bidang lingkungan: adalah ukuran kelajuan panas melalui material. Konduktivitas termal dinyatakan dalam kalori persentimeter perdetik perderajat Celcius ($\text{cal/cm/sec/}^{\circ}\text{C}$).

Definisi difusivitas termal antara lain:

- a. Di bidang rekayasa kelistrikan: adalah hasil bagi konduktivitas termal material dengan perkalian antara kapasitas panas jenis dengan massa jenisnya
- b. Di bidang militer: adalah laju perubahan temperature dalam bahan, yang
- b. dinyatakan dalam cm persegi perdetik perderajat
- c. Di bidang fisika: adalah konduktivitas termal dibagi perkalian panas jenis dengan dengan satuan massa
- d. Di bidang lingkungan: adalah laju perubahan suhu dalam bahan, yang dinyatakan dalam centimeter persegi per detik.

Secara matematis difusivitas termal bahan atau medium adalah konduktivitas termal bahan dibagi perkalian kerapatan bahan dengan kapasitas panas bahan, pada tekanan konstan (sumber: Wikipedia). Dalam system internasional, satuan difusivitas termal (α) adalah m^2/s .

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \dots\dots\dots(2-7)$$

Dimana k adalah konduktivitas termal ($W/(m \cdot K)$), ρ adalah kerapatan (kg/m^3), dan c_p adalah kapasitas panas jenis ($J/(kg \cdot K)$). Difusivitas termal merupakan ukuran inerti termal bahan. Dalam bahan yang difusivitas termalnya tinggi, panas akan mengalir lebih cepat. Difusivitas termal bahan atau medium antara lain disajikan pada Tabel-2.2.

Tabel-2.2. Difusivitas termal beberapa jenis bahan (sumber: Wikipedia)

Bahan/materi	Difusivitas termal (m^2/s)
Uap air pada tekanan 1 atm, suhu 400 K	2.338×10^{-5}
Udara pada tekanan 1 atm, suhu 300 K	2.2160×10^{-5}
Air pada suhu 300 K	1.4×10^{-7}
Udara (standar)	1.9×10^{-5}
Argon pada suhu 300 K, tekanan 1 atm	2.2×10^{-5}
Helium pada suhu 300 K, tekanan 1 atm	1.9×10^{-4}
Kayu (Yellow Pine)	8.2×10^{-8}

Di alam, difusi termal terjadi karena perbedaan kapasitas materi atau bahan menyerap energy dan kemudian mengemisi radiasi termal (radiasi elektromagnetik dengan puncaknya pada spectrum inframerah termal). Kemampuan bahan atau materi menerima dan menyimpan energy radiasi matahari pada siang hari, menyebabkan difusi termal tetap berlangsung hingga malam hari. Tingkat serapan energy radiasi matahari pada siang hari, konduktivitas materi atau bahan, bentuk dan struktur materi dalam mengendalikan emisi termal, menjadi penentu kuantitas dan arah difusi termal pada siang dan malam hari. Sebagai contoh, pada siang hari di ruang

terbuka penetrasi radiasi matahari lebih besar di banding pada lahan yang tertutup rapat oleh kanopi vegetasi. Energi yang diserap tanah dan partikel udara di bawah kanopi lebih rendah, sehingga emisi termal oleh tanah di bawah kanopi rendah. Pada saat yang bersamaan udara di tempat terbuka menerima energy radiasi matahari lebih banyak dan mengemisi termal lebih besar di banding udara di bawah kanopi. Perbedaan energy termal udara di ruang terbuka dengan udara di bawah kanopi, menimbulkan difusi termal dari ruang terbuka ke dalam hutan. Difusi termal ini dapat berlangsung dalam keadaan tak tertekan (jika kecepatan angin sangat rendah) atau berlangsung dalam keadaan tertekan, jika kecepatan angin tinggi. Besarnya fluks energy termal yang mengalir juga ditentukan oleh konduktivitas atau difusivitas udara. Konduktivitas atau difusivitas udara bervariasi menurut tekanan dan suhu udara.

2.2.2. Persamaan Difusi Termal

Difusi termal dapat berlangsung secara tiga dimensi, dua dimensi atau satu dimensi. Difusi tiga dimensi terjadi pada kasus letusan gunung berapi yang radiasi termalnya memancar ke segala arah. Dalam praktik sering dilakukan pendekatan satu dimensi, dengan mengasumsikan difusi hanya terjadi pada satu arah, sedangkan pada arah lainnya variasi termal akibat difusi dapat diabaikan. Sebagai contoh, difusi termal dari ruang terbuka ke dalam hutan dapat menggunakan pendekatan satu dimensi (mendatar sepanjang transek memotong penampang tepi hutan) dengan mengasumsikan tidak terjadi difusi termal arah vertical dan arah sejajar garis tepi hutan.

Ada dua persoalan utama dalam perumusan dan penentuan solusi persamaan difusi atau konduktivitas termal dalam bahan atau materi atau dalam ekosistem. Pertama adalah bentuk atau model persamaan difusi atau konduksi termal dalam bahan atau materi atau ekosistem. Bentuk persamaan difusi termal berkaitan dengan kondisi dalam bahan misalnya struktur materi (homogen atau tidak), adanya sumber energy dalam bahan atau tidak. Kedua adalah problem nilai batas. Problem nilai batas berkaitan dengan difusi melintasi batas-batas bahan atau ekosistem, misalnya pada sisi-sisi lain dari bahan yang bukan menjadi sisi masuk atau keluarnya fluks energy. Pada bagian ini dideskripsikan persamaan difusi dan konduktivitas termal serta beberapa contoh syarat atau kondisi batas dan awal yang dapat dijadikan

acuan untuk analisis, pemodelan, atau pemecahan masalah difusi/konduksi termal dalam bahan, medium atau ekosistem.

Persamaan difusi termal yang dibahas disini dibatasi pada difusi satu dimensi. Persamaan difusi termal dapat dinyatakan dalam koordinat Kartesian (persamaan 2-8), koordinat silinder (persamaan 2-9) dan koordinat bola (persamaan (2-10))

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{H}}{\rho c_p} \dots\dots\dots(2-8)$$

$$r \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + r \frac{\dot{H}}{\rho c_p} \dots\dots\dots(2-9)$$

$$r^2 \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + r^2 \frac{\dot{H}}{\rho c_p} \dots\dots\dots(2-10)$$

Dimana T adalah suhu, t waktu, difusivitas termal (m^2/s), $\dot{H} = dH/dt$ adalah turunan pertama fluks termal (H) terhadap waktu t atau laju perubahan fluks termal dalam satuan ($Joule/(m^3 \cdot detik)$), ρ kerapatan bahan atau materi (kg/m^3), dan c_p adalah kapasitas panas jenis ($J/(kg \cdot K)$), x adalah jarak dari pusat termal (m), dan r adalah jarak radial dari pusat termal (m). Pilihan koordinat bergantung pada bentuk benda atau bahan dan arah fluks difusi termal. Penting untuk diingat disini bahwa penggunaan parameter difusivitas termal (α) untuk difusi tidak tunak, sedangkan parameter konduktivitas termal (κ) digunakan untuk keadaan tunak. Beberapa kasus sederhana namun dapat memberi pemahaman konseptual tentang difusi termal dan, penetapan syarat batas dan syarat awal adalah sebagai berikut:

Pada keadaan tunak, suhu (T) tidak berubah dari waktu ke waktu sehingga ($\frac{\partial T}{\partial t} = 0$). Persamaan diferensial parsial (persamaan 2-8, 2-9, dan 2-10) berubah menjadi persamaan diferensial biasa ordo dua karena suhu (T) hanya merupakan fungsi jarak.

- 1) Pada keadaan tidak ada nilai \dot{H} ($\dot{H} = 0$): fluks termal konstan
Perubahan temperature dalam bahan, untuk masing-masing sistem koordinat dan solusinya adalah sebagai berikut:

- a) Sistem koordinat Kartesian

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \dots\dots\dots(2-11a)$$

Solusi persamaan (2-11a) adalah:

$$T = Ax + B \dots\dots\dots(2-11b)$$

Nilai koefisien A dan konstanta B bergantung pada kondisi batas (suhu pada bidang batas), dan konduktivitas termal bahan.

b) Sistem koordinat silinder

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \dots\dots\dots(2-12a)$$

Solusi persamaan ((2-12a) adalah:

$$T = A \ln r + B \dots\dots\dots(2-12b)$$

c) Sistem koordinat bola

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dT}{dr} \right) = 0 \dots\dots\dots(2-13a)$$

Solusi persamaan ((2-13a) adalah:

$$T = \frac{A}{r} + B \dots\dots\dots(2-13b)$$

2) Pada keadaan \dot{H} konstan

a) Sistem koordinat Kartesian

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \dot{H} = 0 \dots\dots\dots(2-14a)$$

Solusi persamaan (2-14a) adalah:

$$T = - \frac{\dot{H}x^2}{2k} + Ax + B \dots\dots\dots(2-14b)$$

k adalah konduktivitas termak bahan atau medium

b) Sistem koordinat silinder

$$k \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + r \dot{H} = 0 \dots\dots\dots(2-15a)$$

Solusi persamaan ((2-15a) adalah:

$$T = - \frac{\dot{H}r^2}{4k} + A \ln r + B \dots\dots\dots(2-15b)$$

c) Sistem koordinat bola

$$k \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dT}{dr} \right) + r^2 \dot{H} = 0 \dots\dots\dots(2-16a)$$

Solusi persamaan ((2-16a) adalah:

$$T = -\frac{\dot{H}.r^2}{6k} + \frac{A}{r} + B \dots\dots\dots(2-16b)$$

Pada reaksi homogen ordo-1, yang mengandung reaktan, sehingga berlaku $G = -k C$, maka persamaan difusi termal dan solusinya adalah sbb.:

a) Koordinat Kartesian

$$D \frac{d^2 C}{dx^2} - kC = 0 \dots\dots\dots(2-17a)$$

Solusi persamaan (2-17a) adalah:

$$C = A e^{\sqrt{\frac{kx}{D}}} + B e^{-\sqrt{\frac{kx}{D}}} \dots\dots\dots(2-17b)$$

atau

$$C = A \cosh\left(\sqrt{\frac{kx}{d}}\right) + A \sinh\left(\sqrt{\frac{kx}{d}}\right) \dots\dots\dots(2-17c)$$

b) Koordinat silinder

$$D \frac{d}{dr} \left(r \frac{dC}{dr} \right) - krC = 0 \dots\dots\dots(2-18a)$$

atau

$$D \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dC}{dr} \right) - kr^2 C = 0 \dots\dots\dots(2-18b)$$

Solusi persamaan (2-18b) mengandung fungsi Bessel

Keadaan tidak tunak, tanpa turunan ($\dot{H} = 0$). Untuk koordinat Cartesian berlaku persamaan difusi satu dimensi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \dots\dots\dots(2-19)$$

Dimana $\alpha = k/(\rho.c_p)$, adalah difusivitas termal. Difusivitas termal α menggantikan konduktivitas termal (k) untuk difusi termal tak tunak.

- 1) Kondisi awal homogen $T = T_i$ (atau $T = T_\infty$), dan kondisi batas konstan $T = T_s$ pada $x = 0$, ukuran benda semi berhingga, atau pemberlakuan kondisi awal bertahap pada benda berukuran tak hingga.

Solusinya berbentuk fungsi sesatan (*error function*) atau komplementernya:

$$\frac{T - T_s}{T_i - T_s} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \dots\dots\dots(2-20a)$$

$$\frac{T - T_i}{T_s - T_i} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \dots\dots\dots(2-20b)$$

Dengan kriteria semi berhingga: $\frac{L}{2\sqrt{\alpha t}} \geq 2$

Kondisi ini juga berlaku pada difusi kopel, dimana dua benda yang berbeda suhu (atau konsentrasi), tersambung pada posisi $x = 0$ dan saling terjadi difusi satu sama lain, maka syarat batasnya adalah separuh dari kondisi awal keduanya. Hal ini hanya mungkin jika kedua benda memiliki difusivitas termal yang sama.

- 2) Panas dengan kuantitas tetap berdifusi kedalam benda semi berhingga (atau ukuran tak berhingga, tanpa fluks masuk melalui $x = 0$, kondisi awal $T = T_i$ (atau $T = T_\infty$) yang berlaku pada semua posisi kecuali pada ketebalan δ untuk benda semi berhingga atau 2δ untuk benda tak hingga dimana $T = T_0$. Solusinya berbentuk:

$$T = T_i + \frac{(T_0 - T_i)\delta}{\sqrt{\pi\alpha t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) \dots\dots\dots(2-21)$$

- 3) Pada kondisi batas serbasama ($T = T_i$), kondisi batas konstan ($T = T_s$) pada $x = 0$ dan $x = L$ (atau kondisi batas fluks nol: $q_x = -k\partial T/\partial x = 0$ pada $x = L/2$), benda dengan ukuran berhingga, atau kondisi awal periodic pada benda tak hingga. Solusinya berbentuk deret Fourier:

$$T(x,t) = T_s + (T_i - T_s) \sum_{n=0}^{\infty} a_n \exp\left(-\frac{n^2\pi^2\alpha}{L^2}t\right) \sin\frac{n\pi}{l}x \dots\dots\dots(2-22)$$

- a. Persamaan konduksi panas.

Persamaan konduktivitas panas dapat dideskripsikan dengan perambatan panas dalam batang logam yang distribusi material dan bentuknya homogen. Panas hanya masuk dari salah satu ujung (kiri), sedang ujung

lain dan sisi batang logam terisolasi (tidak ada panas keluar atau masuk melalui sisi dan ujung kanan). Berdasarkan hukum kekekalan energy, maka laju perubahan energy dalam batang dengan ukuran berhingga sama dengan total panas mengalir ke dalam batang. Jika $h(x,t)$ menyatakan fluks panas, yakni laju aliran panas pada posisi x dan waktu t , dan kita melakukan tinjauan pada arah memanjang batang antara posisi x dan Δx , maka laju perubahan total energy yang diterima bagian batang ini sama dengan energy panas yang mengalir melalui ujung kiri batang:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_x^{x+\Delta x} c(z)T(z,t) dz = -h(x + \Delta x, t) + h(x) \dots \dots (2-25)$$

Variabel z pada persamaan (2-25) menyatakan jarak dari ujung kiri batang, ke posisi antara x dengan $x+\Delta x$. Jika ruas kiri dan kanan dibagi Δx dan kita memandang bahwa rentang $\Delta x \rightarrow 0$, adalah posisi x dalam batang maka persamaan (2-25) menjadi

$$c(x) \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = - \frac{\partial h(x,t)}{\partial x} \dots \dots \dots (2-26)$$

Persamaan (2-26) menyatakan hubungan antara laju perubahan suhu dengan gradient fluks termal pada posisi x . Hukum pendinginan Fourier menyatakan bahwa laju aliran panas berbanding lurus dengan perubahan spasial temperature. Secara matematis hukum ini berbentuk:

$$h(x,t) = -k(x) \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \dots \dots \dots (2-27)$$

$k(x)$ adalah konduktivitas termal yang harganya lebih besar nol. Tanda negative pada persamaan (2-27) menunjukkan bahwa bertambahnya panas (h) yang masuk ke dalam batang, menyebabkan peningkatan suhu mulai dari ujung kiri; suhu pada ujung kiri lebih tinggi dan semakin menurun ke ujung kanan. Jika persamaan (2-26) dan (2-27) digabung maka diperoleh persamaan:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \dots \dots \dots (2-28)$$

dimana $\gamma = k/c$

Persamaan (d) menggambarkan perubahan suhu dalam batang berhingga, satu dimensi, homogen, tidak ada sumber panas dalam batang, dan bergantung pada kondisi awal (*initial condition*) dan kondisi batas

(*boundary condition*). Untuk menentukan harga $T(x,t)$ kita harus mengetahui bagaimana panas ditransmisi melalui ujung batang (kiri). Ada dua rumusan kondisi batas (untuk ujung kanan) yang relevan secara fisis yakni:

$$T(l,t) = \alpha(t) \dots\dots\dots(2-29)$$

dan

$$H(l,t) = k(l) \frac{dT(l,t)}{dx} = \beta(t) \dots\dots\dots(2-30)$$

Persamaan (2-29) menunjukkan bahwa suhu bagian ujung dikendalikan mengikuti $\alpha(t)$. Kondisi batas ini dikenal sebagai kondisi batas Dirichlet (*Dirichlet boundary condition*). Kondisi batas yang dinyatakan dalam bentuk persamaan (2-30) membutuhkan penetapan aliran panas keluar dari ujung kanan batang. Kondisi batas ini dikenal sebagai kondisi batas Neumann (*Neumann boundary condition*). Dalam keadaan khusus dimana $\beta(t) = 0$, maka berlaku kondisi dimana kedua ujung batang terisolasi. Kondisi batas ini dikenal sebagai kondisi batas Neumann untuk keadaan homogeny (*homogeneous Neumann boundary conditions*)

Solusi analitik menggunakan teknik pemisahan variable:

Solusi dasar persamaan (2-28) yang umum digunakan adalah menggunakan teknik pemisahan variable dengan mendefinisikan fungsi $T(x,t)$ sebagai perkalian dua fungsi, yang satu sebagai waktu (t) dan yang kedua sebagai fungsi posisi sbb:

$$T(x,t) = X(x).U(t) \dots\dots\dots(2-31)$$

Persamaan (2-22) menghasilkan

$$\frac{\partial T}{\partial t} = U'(t).X(x) \quad \text{dan} \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = X''(x).U(t)$$

dan jika disubstitusi pada persamaan (2-19) dihasilkan persamaan

$$\frac{U'(t)}{U(t)} = \gamma \frac{X''(x)}{X(x)} \dots\dots\dots(2-32)$$

Ruas kiri persamaan (2-32) merupakan fungsi waktu semata sedangkan ruas kanan merupakan fungsi posisi semata. Kedua fungsi memiliki nilai yang sama, dan hanya mungkin jika persamaan (2-32) memiliki nilai konstan. Jika dipilih konstanta $-\lambda$ kita memperoleh dua persamaan:

$$U'(t) + \lambda U(t) = 0 \dots\dots\dots(2-33a)$$

dan

$$-\gamma.X''(x) = \lambda.X(x) \dots\dots\dots(2-33b)$$

Jika ditetapkan kondisi batas: $T(x,0) = X(x)$ untuk $0 \leq x \leq 1$ maka diperoleh $U(t) = e^{-\lambda t}$ dan persamaan (2-31) menjadi

$$T(x,t) = e^{-\lambda t} X(x) \dots\dots\dots(2-34)$$

Persamaan (2-33b) merupakan problema eigen persamaan diferensial ordo dua dari operator $K = -\gamma \frac{d^2}{dx^2}$ dengan nilai eigen λ dan fungsi eigen $X(x)$.

Kondisi batas homogen:

Jika kita tinjau problem nilai batas Dirichlet sederhana untuk konduksi panas dalam batang homogen, dengan kedua ujung memiliki suhu nol derajat, maka syarat batasnya adalah

$$T(0,t) = T(1,t) = 0 \quad \text{untuk } t \geq 0 \dots\dots\dots(2-35)$$

Kondisi awal yang berlaku disini adalah

$$T(x,0) = g(x) \quad \text{untuk } 0 < x < 1 \dots\dots\dots(2-36)$$

Syarat batas dan syarat awal ini memungkinkan kita mendapatkan nilai eigen dan fungsi eigen $X(x)$ pada persamaan (2-33b)., berdasarkan nilai batas : $X(0) = X(1) = 0$. Dari persamaan (2-33b) diperoleh nilai eigen λ adalah ril.

Solusi persamaan (2-33b) adalah kombinasi trigonometri:

$$X(x) = a \cos \omega x + b \sin \omega x \dots\dots\dots(2-37)$$

dimana $\lambda = \gamma \omega^2$ dan $\omega > 0$. Dengan nsyarat batas $X(0) = 0$ diperoleh nilai koefisien $a = 0$. Dari syarat batas kedua $X(1) = 0$ maka berarti fungsi eigen untuk $0 < x < 1$ hanya mungkin memiliki harga jika b tidak nol, dan ω adalah kelipatan bulat dari π . Jadi nilai eigen dan fungsi eigen dari dari problema nilai eigen (f) dengan syarat batas $X(0) = X(1) = 0$ adalah

$$\lambda_i = \gamma \left(\frac{i\pi}{l} \right)$$

dan

$$X_i(x) = \sin \frac{i\pi}{l} x$$

dimana $i = 1, 2, 3, \text{ dst.}$

Solusi fungsi suhu $T(x,t)$ yang diperoleh dari persamaan (2-31) dan nilai $\lambda = \gamma \omega^2$ adalah

$$T_i(x,t) = \exp\left(-\frac{\gamma i^2 \omega^2}{l^2} t\right) \sin \frac{i\pi}{l} x \dots\dots\dots(2-38)$$

Superposisi linier dari persamaan (2-38) juga adalah solusi, sehingga:

$$T(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{\gamma i^2 \omega^2}{l^2} t\right) \sin \frac{i\pi}{l} x \dots\dots\dots(2-39)$$

Dengan kondisi awal yang diberikan pada persamaan (2-36) diperoleh

$$T(x,0) = g(x) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \sin \frac{i\pi}{l} x \dots\dots\dots(2-40)$$

Persamaan (j) merupakan fungsi Fourier sinus pada interval $(0, l)$ dengan syarat awal $g(x)$. Koefisien a_i dapat ditentukan berdasarkan sifat orthogonal fungsi eigen, atau dengan teknik integrasi perbagian:

$$a_k = \frac{2}{l} \int_0^l g(x) \sin \frac{k\pi}{l} x \, dx, \quad k = 1, 2, 3, \dots\dots\dots(2-41)$$

Contoh:

Untuk problem nilai awal dan nilai batas :

$$T(0, t) = T(l, t) = 0; \quad T(x, 0) = g(x) = x \quad \text{untuk } 0 \leq x \leq 1$$

$$\text{dan} \quad g(x) = -x + 2 \quad \text{untuk } 1 \leq x \leq 2$$

untuk persamaan panas pada balok logam homogeny, panjangnya 2 satuan panjang. Koefisien Fourier dari $g(x)$ adalah:

$$a_{2k+2} \equiv 0; \quad a_{2k+1} = (-1)^k \frac{8}{(2k+1)^2 \pi^2}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Solusi dalam bentuk deret Fourier adalah:

$$T(x,t) = 8 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{-1^i}{(2i+1)^2 \pi^2} \exp\left(-\frac{(2i+1)^2 \pi^2}{4} t\right) \sin\left(i + \frac{\pi}{2}\right) x$$

2.3. Difusi Termal dalam Eksositem Hutan dan Hutan Mangrove

Ekosistem hutan dapat dipandang seperti bahan atau medium dimana terjadi difusi termal dari lingkungan ke dalam ekosistem dan sebaliknya. Difusi energy dalam alam berlangsung dalam dua spectrum radiasi elektromagnetik yakni difusi pada spectrum gelombang cahaya (sering disebut gelombang pendek) dan difusi pada spectrum gelombang inframerah (sering disebut gelombang panjang). Difusi pada spectrum gelombang cahaya berbentuk transmisi energy cahaya dari satu tempat ke tempat lain. Dalam ekosistem hutan, difusi energy cahaya dapat terjadi pada vegetasi, dan udara di bawah vegetasi. Difusi ini terukur pada variable intensitas cahaya atau kuat penerangan di bawah kanopi. Difusi energy cahaya juga terukur (secara tidak langsung) melalui peningkatan suhu medium (kanopi, udara, tanah dan air) dimana energy cahaya yang diterima diserap untuk dirubah menjadi panas laten dan panas sensible. Studi terdahulu menganalisis difusi energy pada spectrum tampak mata melalui variable intensitas radiasi matahari antara lain dilakukan oleh Lieffers (1999), Hale (2001), Hale (2003), North *et al* (2005). Jennings *et al* (1998) mengemukakan bahwa radiasi matahari dapat diukur melalui tiga cara yakni:

- a. Pengukuran fotometrik, yakni pengukuran iluminasi atau kecerahan (*brightness*) sebagaimana yang diterima mata. Iluminasi atau kuat penerangan diukur dalam satuan lumen, lux atau foot candle. Menurut Jennings *et al* (1998), ukuran radiasi matahari pada spectrum ini tidak berpengaruh kuat pada proses tumbuhan sehingga kurang diperhatikan dalam kajian ekologi tumbuhan
- b. Pengukuran radiometrik, yang mengukur energy pada masing-masing spectrum (*waveband*) yang dinyatakan dalam satuan Joule atau jika dikaitkan dengan waktu dinyatakan dalam Watt. Menurut Jennings *et al* (1998), spektrum yang paling penting dalam fisiologi tumbuhan adalah spectrum inframerah hingga inframerah jauh.
- c. Pengukuran kuantum, yakni mengukur proporsi radiasi matahari yang digunakan dalam proses fotosintesa (*photosynthetically active radiation – PAR*), yang didefinisikan sebagai total fluks kuantum yang diterima persatuan luas. Satuannya dinyatakan dengan mole. Kandungan energi kuantum bervariasi bergantung panjang gelombang radiasi.

Tiga cara pengukuran radiasi matahari yang dikemukakan Jennings *et al* tersebut di atas sebenarnya tidak lain adalah komponen-komponen energy radiasi yang dipantulkan dan ditransmisi dalam spectrum tampak mata dan

yang diserap oleh bahan di permukaan bumi, kemudian diubah menjadi energy panas (panas latent dan panas sensible). Sebagian panas sensible (dalam tingkatan tertentu – bergantung sifat termal bahan/obyek dan kondisi lingkungan) diemisikan dalam bentuk fluks permukaan. Panas latent sebagiannya dimanfaatkan untuk proses fotosintesa dan pemanfaatan lainnya. Komponen-komponen energy ini ditunjukkan dalam persamaan (2-5). Pengukuran fotometrik yang dikemukakan oleh Jennings et al, adalah pengukuran radiasi matahari (langsung dan/atau albedo) pada spectrum cahaya. Pengukuran radiometric pada dasarnya adalah pengukuran fluks panas permukaan yang terjadi akibat perbedaan emisi termal bahan, karena menerima energy matahari atau dari sumber energy termal lainnya. Pengukuran fotometrik dilakukan pada spektrum inframerah, karena radiasi puncak dari emisi radiasi elektromagnetik permukaan bumi berada dalam spectrum inframerah. Pengukuran kuantum pada dasarnya untuk mengukur energy radiasi matahari yang dirubah menjadi panas latent untuk dimanfaatkan dalam proses fotosintesa dan proses biofisik lainnya. Pengukuran fotometrik umumnya didasarkan pada pengukuran kuantitas atau proporsi radiasi matahari yang menembus canopy, antara lain dilakukan oleh: Canham *et al* (1990), Smith *et al* (1992), Rich *et al* (1993),. Pengukuran kuantum antara lain dilakukan oleh Rich *et al* (1993),.

Pada siang hari, difusi termal dapat berasal dari dua sumber yakni radiasi langsung matahari dan emisi radiasi termal oleh obyek yang ada di permukaan. Perbedaan tingkat penyerapan energy, kapasitas bahan/materi mengendalikan energy berkaitan dengan kerapatan massa, panas jenis benda, menyebabkan perbedaan suhu dan akhirnya menyebabkan perbedaan emisi termal oleh benda. Perbedaan radiasi termal ini menyebabkan difusi termal antara benda pada siang maupun malam hari. Difusi termal dapat berlangsung antara ekosistem hutan dengan lingkungan dan antara komponen dalam ekosistem, misalnya antara partikel udara di bawah struktur dan kerapatan kanopi yang berbeda. Difusi termal ini membentuk iklim mikro khusus untuk ekosistem hutan. Studi tentang difusi termal dalam ekosistem hutan dan antara ekosistem dengan lingkungan didasarkan pada variasi iklim mikro: a.l. suhu udara, kelembaban udara, suhu tanah, kelembaban tanah (Chen *et al.*, 1993; Chen and Franklin, 1997; Chen *et al*, 1999; Aussenac, 2000; Mueller and Day, 2005; Godefroid *et al*, 2006). Penelitian pengaruh penyinaran terhadap pertumbuhan dan ukuran pohon,

dan dan arsitektur kanopi dilakukan oleh Niinemets and Kull (1995). Sone *et al* (2005) menyimpulkan bahwa diameter cabang pohon muda (acer trees) sangat bergantung pada penyinaran matahari.

Penelitian tentang difusi atau konduktivitas termal dalam ekosistem hutan a.l. dilakukan oleh De Souza *et al* (2006) yang meneliti sifat konduksi termal kedalam tanah pada area yang tertutup hutan dan yang terbuka. Mereka menemukan bahwa konduksi termal ke dalam tanah di bawah kanopi pohon, besarnya satu ordo lebih rendah dibanding konduksi termal pada tanah terbuka. Kajian konduksi termal dalam tanah juga dilakukan oleh North *et al*, 2005. Ma *et al* (2010) mengemukakan bahwa fluks panas tanah meningkat secara dramatis dan menyebabkan kenaikan suhu tanah pada plot-plot yang mengalami perampingan pohon dan pembakaran.

Xian-jun *et al* (2003), melakukan penelitian difusi termal udara di bawah pohon pinus, dan menyimpulkan bahwa kelembaban dan suhu udara adalah factor penting dan menentukan proses difusi termal di bawah pohon pinus. Difusi termal dalam hutan sebanding dengan suhu udara dan kelembaban awal. Suhu berkorelasi kuat (linier) dengan jarak dari area yang panas, dengan pola perubahan spasial berbentuk logaritmik hingga eksponensial. Ma *et al* (2010) mengemukakan bahwa dampak pembakaran dan perampingan area pohon menyebabkan peningkatan suhu udara sebagai indicator perubahan difusi termal. Perubahan difusi termal akibat penggunaan lahan terukur dalam pertukaran energy antara ekosistem hutan dengan atmosfer (Ibrom *et al*, 2007)

Radiasi matahari juga berperan penting dalam proses-proses fisis dan biologis dalam hutan mangrove. Radiasi matahari mengendalikan evaporasi, evapotranspirasi, suhu udara dan kelembaban udara. Variabel-variabel fisis saling berinteraksi, misalnya evaporasi dan evapotranspirasi dipengaruhi oleh gabungan penyinaran, suhu udara, kelembaban dan kecepatan angin (Medeiros and Kjerfve, 1993; Hollins and Ridd, 1997). Seperti pada ekosistem hutan di daratan, radiasi matahari langsung dan yang diserap, digunakan untuk pertumbuhan dan penyebaran benih mangrove (Lo'pez-Hoffman *et al*, 2006; 2007; Christian, 2005). Pemanfaatan radiasi masuk untuk proses fotosintesa dalam hutan mangrove antara lain diteliti oleh Ball and Critchley (1982), Bjorkman (1988), Rijkers *et al* (2000), Hanba *et al* (2002). Penelitian difusi termal melalui pengukuran variable iklim mikro dalam hutan mangrove antara lain dilakukan oleh Hernandez *et al* (2011)

yang menyimpulkan bahwa perubahan struktur hutan karena penebangan menyebabkan perubahan difusi termal yang berakibat pada peningkatan suhu udara sebesar 11°C dan suhu tanah sebesar 13°C. Difusi termal antara ekosistem hutan dengan lingkungan dapat dianalisis berdasarkan variasi spasial iklim mikro sepanjang transek memotong batas ekosistem hutan dengan daerah terbuka (Godefroid *et al* 2006). Untuk ekosistem hutan mangrove, selain variable iklim mikro tersebut di atas, suhu air merupakan variable yang signifikan mencirikan proses difusi termal. Pertumbuhan mangrove membutuhkan suhu udara dan suhu air dalam rentang tertentu dan ini berkaitan dengan difusi atau konduktivitas termal dalam komponen-komponen ekosistem dan lingkungan. Penelitian yang dilakukan oleh Hawley (2010) menunjukkan korelasi yang kuat antara penyinaran dengan suhu air

Kesesuaian struktur kanopi dan difusi organism dalam hutan dengan difusi termal membuktikan kebergantungan species pohon dan species organism dalam hutan terhadap energy radiasi matahari dan energy termal yang diemisi permukaan bumi. Difusi termal yang dinyatakan dalam variasi temporal dan spasial, gradient dan kedalaman efek tepi iklim mikro berkorelasi kuat dengan pola spasial kanopi dan pergerakan species biota dalam hutan. Hasil penelitian membuktikan bahwa struktur kanopi dan pola vegetasi berkorelasi dengan penyinaran (Smith *et al*, 1992), gradient suhu udara dan kelembaban (Williams-Linera, 1990; Young and Mitchell, 1994). Yoko-o and Tokeshi (2011) mengemukakan karakteristik pohon yang bertumbuh pada batas daratan dengan laut, yakni pohon yang terletak di bagian depan menghadap laut lebih pendek, dengan cabang bertingkat dan kanopi yang lebih terbuka (lebih banyak ruang antara cabang) untuk lebih banyak menerima cahaya dan dapat menciptakan heterogenitas lingkungan yang dibutuhkan oleh organism. Young and Mitchell (1994), mengemukakan bahwa tepi hutan dan efek tepi vegetasi berkorelasi dengan efek tepi iklim mikro.

Kesesuaian difusi termal dengan pergerakan atau difusi species hewan ditunjukkan oleh persamaan difusi species yang dirumuskan oleh Fagan *et al* (1999). Dalam perumusan (matematik) difusi species, Fagan *et al* mengemukakan pentingnya pemahaman tentang tambalan (*patch*) dan matrik (*matrix*). Matriks adalah area berbatasan atau yang membatasi suatu habitat ekologis. Tambalan adalah bagian habitat yang dapat dipandang homogen.

Suatu habitat dapat terdiri dari beberapa tambalan yang berdampingan. Tambalan misalnya membedakan hutan dari jenis yang sama namun dengan usia pohon yang berbeda. Difusi species sepanjang transek memotong batas habitat (hutan) dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial parsial:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = \nabla \cdot D(\mathbf{x}) \nabla u_i + f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \dots\dots\dots(2-42)$$

untuk perubahan species dalam tambalan, dan

$$\alpha_i u_i + \beta_i \frac{\partial u_i}{\partial n} = g(u_i) \dots\dots\dots(2-43)$$

untuk perubahan species pada batas tambalan. dimana u_i adalah kerapatan populasi species i, D adalah laju difusi species, x adalah lokasi dalam satu dimensi atau lebih, ∇ adalah operator gradient (untuk mengkuantisasi laju perubahan kerapatan dalam dimensi spasial, α_i dan β_i masing-masing adalah koefisien modifikasi kerapatan species i dan laju perubahan species i pada batas tambalan, sedangkan \mathbf{n} adalah vektor satuan normal (*outward*) terhadap bidang batas (Fagan *et al.*, 1999). Persamaan (2-42) menunjukkan dinamika yang terjadi dalam tambalan sedangkan persamaan (2-43) menentukan apa yang terjadi pada bidang batas tambalan yang menjadi syarat batas sistem. Persamaan di atas menunjukkan bahwa model dinamika-difusi species sama dengan difusi fluks termal dalam ekosistem. Pakar-pakar pemodelan dalam bidang ekologi berusaha merumuskan $f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ pada persamaan (2-42) untuk mendapatkan bentuk khusus kerapatan populasi species pada satu lokasi x. Fagan *et al.*, (1999) mengutip Groom and Schumaker, 1990, mengemukakan model matematik difusi species tunggal di dalam dan pada batas habitat tambalan Ω (Gambar-2.5) berbentuk :

$$\frac{\partial s}{\partial t} = D \nabla^2 s + r s (1 - s/K) \text{ (dalam tambalan } \Omega), \dots\dots\dots(2-44)$$

dan

$$s = 0 \quad \text{(pada batas tambalan } \Omega) \dots\dots\dots(2-45)$$

Difusi interaktif dua species pada bidang batas tambalan Ω_1 dan Ω_2 (Gambar-2.5) mengikuti persamaan kompetisi Lotka-Voterra :

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = D_1 \nabla^2 u_1 + r_1 \left(1 - \frac{u_1}{K_1} - \frac{u_{12}}{K_1} u_2 \right) u_1 \dots\dots\dots(2-46)$$

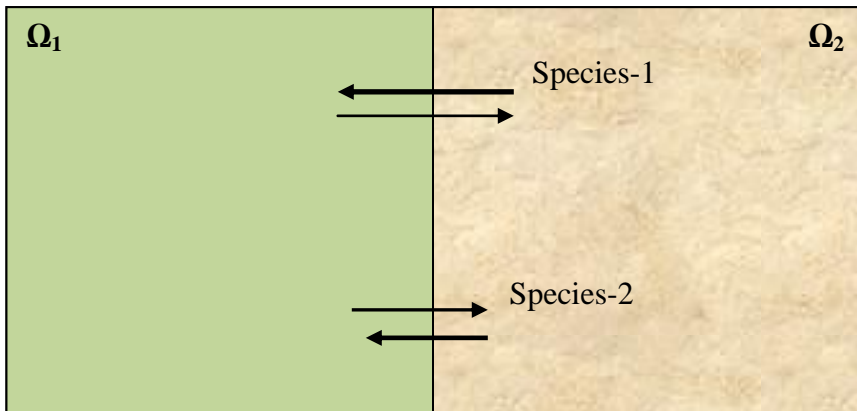
dan

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = D_2 \nabla^2 u_2 + r_2 \left(1 - \frac{u_2}{K_2} - \frac{a_{21}}{K_2} u_1\right) u_2 \dots\dots\dots(2-47)$$

(berlaku dalam habitat Ω , yang terdiri dari tambalan Ω_1 dan Ω_2).
 Syarat batas yang berlaku untuk habitat Ω adalah :

$$u_i = 0 \dots\dots\dots(2-48)$$

dimana u_i adalah kerapatan populasi species i , D_i , r_i dan K_i masing-masing adalah laju difusi, tingkat reproduktif, dan daya dukung (*carrying capacity*) species i , a_{12} dan a_{21} adalah kekuatan interaksi kompetitor.



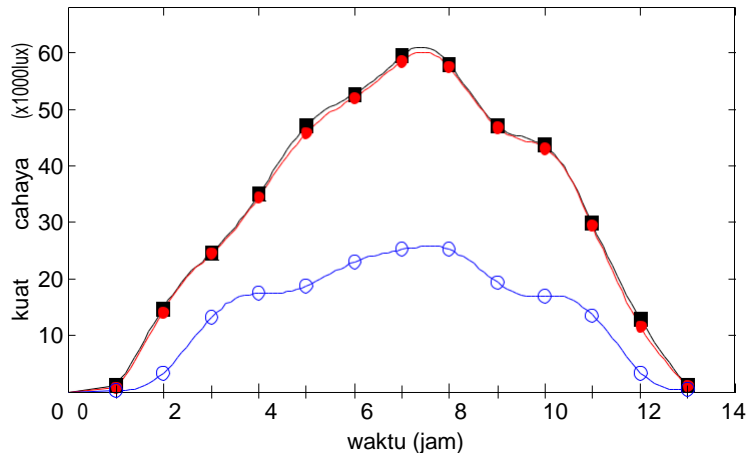
Gambar-2.5. Skema interaksi species pada batas tambalan dalam satu habitat

Persamaan difusi species pada dasarnya sama dengan persamaan difusi termal (bandingkan persamaan 2-42 dan 2-44 dengan 2-19). Variasi kondisi batas, kondisi internal habitat yang homogen atau tidak homogen atau adanya kompetisi antar species memunculkan variasi tingkat kesulitan dalam penentuan keberadaan species pada satu posisi, pada waktu tertentu. Kendati demikian, dari persamaan dasar difusi termal seperti persamaan 2-19 dengan solusinya persamaan 2-22, solusi persamaan difusi species mengandung komponen dalam domain waktu yang berbentuk eksponensial dan domain ruang/posisi yang berbentuk sinuoidal (periodik). Artinya pergerakan species dalam tambalan akan membentuk konsentrasi species yang bergeser sepanjang transek memotong tepi seperti perambatan usikan dalam air.

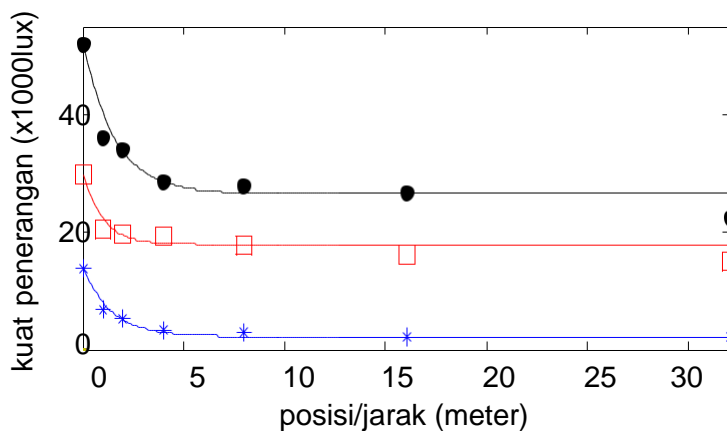
Perbedaan difusi species dengan difusi termal terletak pada kondisi batas dan kondisi awal. Difusi termal harian dikendalikan oleh radiasi matahari, yang berubah sinusoidal dengan periode separuh. Energi radiasi matahari dalam

spektrum tampak mata atau energi cahaya pada bidang batas hutan berubah secara periodik dan difusi cahaya ke dalam hutan juga berubah secara periodik. Misalkan kita melakukan pengamatan pada beberapa posisi sepanjang transek memotong batas hutan dengan tempat terbuka. Pengamatan atau pengambilan data dilakukan dalam interval waktu tertentu, misalnya 1 jam, antara jam 06.00

– 18.00. Data intensitas cahaya atau kuat penerangan yang diperoleh adalah data dalam domain posisi dan waktu ($I(x,t)$). Jika kita membuat grafik perubahan I pada posisi tertentu misalnya 4 meter dalam hutan ($I(4,t)$) maka grafik yang dihasilkan berbentuk sinusoidal paruh waktu (satu periode = 24 jam) (Gambar-2.6). Jika kita membuat grafik data berbasis waktu misalnya untuk jam 09.00 maka kuat penerangan akan menurun secara eksponensial, terjal pada tepi hutan kemudian semakin landai ke tengah hutan (Gambar-2.7).



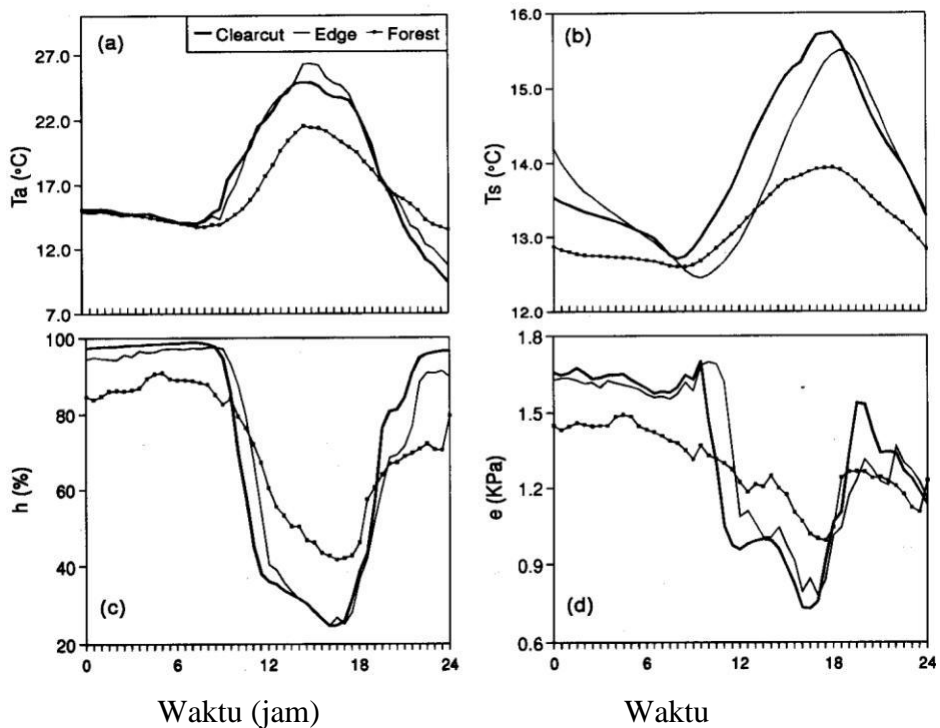
Gambar-2.6. Perubahan temporal kuat penerangan antara jam 06.00 hingga jam 18.00 pada tiga posisi : 2 m dari tepi ke arah luar (kurva warna hitam, di tepi (kurva warna merah) dan 32 meter di dalam hutan mangrove (kurva warna biru) Lokasi: hutan mangrove di teluk Talengen, tanggal pengambilan data 2 Juni 2011, keadaan cuaca cerah



Gambar-2.7. Perubahan spasial kuat penerangan sepanjang transek pada jam 06.00 (warna biru), jam 12.00 (warna hitam) dan jam 17.00 (warna merah). Lokasi: hutan mangrove di teluk Talengen, tanggal pengambilan data 2 Juni 2011, keadaan cuaca cerah

Kondisi batas dan kondisi awal konsentrasi species dalam hutan dan lingkungan sekitar dapat lebih bervariasi dibanding kondisi batas dan dan kondisi awal penyinaran. Variasi kondisi batas dan kondisi awal difusi species berbeda antara species yang satu dengan yang lain bergantung pada sifat: toleran atau intoleran terhadap penyinaran (Godefroid and Koedam, 2003; Magnuson *et al.*, 1979; Gehlhausen *et al.*, 2000), kepekaan terhadap suhu udara (Brosofske *et al.*, 1997; Zheng *et al.*, 2000), suhu tanah atau air, kebiasaan mencari makan dan berteduh, kompetisi antar species dll. Bergantung pada jenis species, kondisi batas difusi species dapat memiliki harga nol (species yang bersangkutan tidak ada yang hidup di luar tepi), konstan, bertambah atau berkurang periodik. Perubahan periodik konsentrasi species di tepi ekosistem hutan terutama berkaitan dengan perubahan iklim mikro.

Variasi kemampuan obyek atau benda dipermukaan bumi menyerap, menyimpan dan mengemisi radiasi termal, menghasilkan perubahan harian variabel-variabel iklim mikro seperti: suhu udara, kelembaban udara, suhu tanah, kelembaban tanah. Perubahan temporal variabel-variabel tersebut berbentuk sinusoidal dengan periode 24 jam. Berbeda halnya dengan intensitas radiasi, variabel-variabel iklim mikro lainnya berubah karena difusi termal berlangsung siang dan malam hari. Difusi termal dalam ekosistem hutan sepanjang hari dapat berubah arah dan kuantitas fluks. Difusi termal sepanjang hari bergantung pada emisi termal, kuantitas termal tersimpan dalam ekosistem atau komponen ekosistem, dan kondisi energi termal di lingkungan. Perubahan iklim mikro harian akibat fluks termal juga menyebabkan perubahan spasial dari posisi tepi ke tengah hutan. Perubahan temporal (harian) variabel iklim mikro diperlihatkan pada Gambar-2.8. Gambar-2.9 memperlihatkan fluktuasi kecepatan angin dan perubahan temporal intensitas radiasi matahari. Gambar-2.10 memperlihatkan perubahan spasial variabel iklim mikro.



Gambar-2.8 Perubahan temporal (harian): (a) suhu udara (T_a), (b) suhu tanah (T_s), (c) kelembaban relatif (h), dan (d) tekanan uap (e) pada lokasi terbuka (*clearcut*), di tepi (*edge*) dan di dalam Douglas-fir forest (*forest*) (sumber: Chen *et al.*, 1993)

Penjelasan perubahan harian variable-variabel iklim mikro (Gambar-2.8) adalah sebagai berikut:

Perubahan suhu udara harian antara tiga lokasi berpola sinusoidal (Gambar-2.8a) dengan suhu minimum terjadi pada jam 06.00 dan maksimum sekitar jam 15.00. Rasio suhu udara sepanjang waktu antara ketiga lokasi berbeda pada saat langit cerah dan berawan sebagian; tetapi perbedaan itu kecil pada saat berawan. Suhu udara di tempat terbuka dan di tepi meningkat lebih cepat di awal pagi hari disbanding dalam hutan. Pada saat suhu di tempat terbuka mencapai puncak sekitar jam 14.30 – 15.00, suhu pada bagian tepi tetap naik hingga mencapai harga maksimumnya. Pada pertengahan sore hari suhu di tepi lebih tinggi dari suhu di tempat terbuka, sedangkan suhu di dalam hutan tetap menunjukkan harga terendah. Pada saat itu kurva suhu pada ketiga posisi menurun, dimana penurunan pada tempat terbuka dan tepi lebih cepat disbanding dalam hutan. *Trend* penurunan ini berlangsung terus hingga pagi pada keesokan harinya. Suhu udara minimum pada pagi hari menunjukkan angka tertinggi di dalam hutan disbanding dua lokasi lainnya. Pada waktu malam, suhu udara sedikit lebih dingin di tepi, tapi dapat menjadi lebih panas pada kondisi khusus, misalnya jika terjadi proses pemanasan local.

Perubahan suhu tanah sama dengan suhu udara (Gambar-2.8b). Fluktuasi harian suhu utama lebih rendah di dalam hutan dibanding di tepi dan di tempat terbuka. Selama siang hari suhu tanah di tempat terbuka dan di tepi lebih tinggi dari suhu tanah di dalam hutan, tapi pada malam hari suhu tanah di dalam hutan lebih tinggi. Berbeda halnya dengan suhu udara, suhu tanah di tempat terbuka selalu lebih tinggi dari tepi baik dalam keadaan langit cerah maupun berawan sebagian. Perbedaan suhu tanah antara tempat terbuka dengan tepi sangat kecil pada saat berawan atau hujan. Pada semua kondisi cuaca, perbedaan suhu tanah antara tepi dengan lokasi dalam hutan lebih besar dibanding suhu udara (Table-2.3).

Tabel-2.3. Perbedaan suhu dan kelembaban di tepi dengan di dalam hutan pada berbagai kondisi cuaca local (cerah, berawan sebagian, berawan/hujan) (Sumber: Chen *et al.*, 1993)

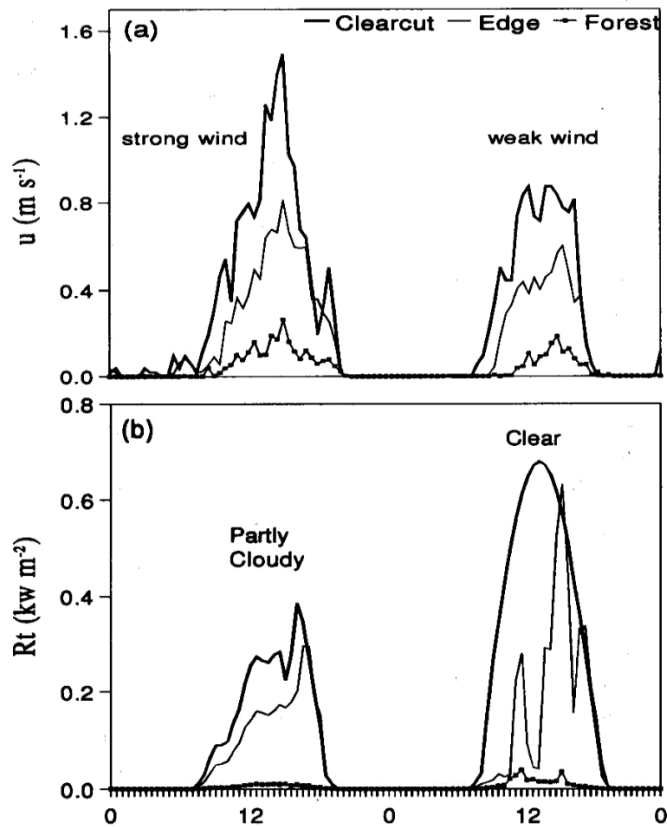
Variable weather by time	Condition	No. measured	Mean difference	Standard error	Max.	Min.
<i>Air temperature (°C)</i>						
Day	Clear	24	3.62	0.34	7.04	0.95
	P/Cloudy	17	3.53	0.44	7.80	1.29
	Cloudy	13	2.67	0.38	4.89	0.54
Night	Clear	26	-1.51	0.26	-0.15	-5.83
	P/Cloudy	18	-1.47	0.40	0.25	-5.52
	Cloudy	14	-1.29	0.46	0.28	-6.69
<i>Relative humidity (%)</i>						
Day	Clear	23	15.00	1.50	28.49	4.24
	P/Cloudy	17	15.39	1.93	32.77	6.95
	Cloudy	14	13.06	1.99	28.68	2.98
Night	Clear	24	6.05	1.61	35.97	-1.63
	P/Cloudy	16	6.65	2.27	26.93	-2.05
	Cloudy	14	5.75	1.98	25.87	-1.61
<i>Soil temperature (°C)</i>						
Day	Clear	36	8.09	0.58	15.52	1.66
	P/Cloudy	21	9.14	0.75	14.73	2.41
	Cloudy	18	7.17	0.85	14.90	2.68
Night	Clear	39	0.72	0.21	3.55	-2.55
	P/Cloudy	21	1.10	0.33	4.34	-1.51
	Cloudy	19	0.62	0.33	2.64	-1.91

Perubahan harian kelembaban relative (h) (Gambar-2.8c) merupakan kebalikan dari perubahan harian suhu udara (bandingkan Gambar-2.8a dengan 2.8c). Pada malam hari, kelembaban udara tinggi mendekati titik jenuh, dan mulai menurun

sekitar jam 08.00 dan mencapai harga minimum sekitar jam 16.00 – 16.30. Selama siang hari, kelembaban relative di tempat terbuka dan di tepi lebih rendah dari lokasi dalam hutan. Pada malam hari, kelembaban terendah di dalam hutan, menengah di tepi dan tertinggi di tempat terbuka. Perbedaan kelembaban relative relative kecil, khususnya antara tempat terbuka dengan tepi hutan. Perbedaan kelembaban relative terbesar antara tempat terbuka dengan di dalam hutan terjadi pada saat langit cerah, tapi perbedaan tersebut dapat diabaikan pada saat cuaca berawan atau hujan. Perbedaan kelembaban relative terbesar antara tepi dengan dalam hutan terjadi pada siang hari dan dapat meningkat hingga 33 % pada kondisi cuaca sangat kering. Tekanan uap memiliki pola yang sama dengan kelembaban relative (Gambar-8d), menunjukkan pengaruh minor suhu udara terhadap kelembaban udara jika dibandingkan antara ketiga lokasi. Kelembaban relative dan tekanan uap air pada tepi berkurang belakangan di pagi hari dibanding pada tempat terbuka.

Gambar-2.9 memperlihatkan fluktuasi kecepatan angin dan perubahan temporal intensitas radiasi matahari. Gambar-2.9a memperlihatkan perbandingan kecepatan angin dan fluktuasinya pada tiga posisi: di tempat terbuka, tepi hutan dan di dalam hutan, serta perbandingan pada kondisi angin bertiup kencang (*strong wind*) dan bertiup lemah (*weak wind*). Grafik memperlihatkan bahwa fluktuasi kecepatan angin, paling kecil di dalam hutan, menengah di tepi dan paling tinggi di tempat terbuka. Di dalam hutan, fluktuasi kecepatan angin pada saat angin bertiup kencang tidak jauh berbeda dari saat angin bertiup lemah. Di tepi dan di tempat terbuka, fluktuasi kecepatan angin saat angin bertiup kencang meningkat sangat signifikan dibanding saat angin bertiup lemah. Menurut Chen *et al.* (1993), prosentase kecepatan angin di dalam hutan terhadap kecepatan di tempat terbuka berkisar 15 – 20 %, sedangkan di tepi berkisar 60 – 70%

Perubahan harian radiasi cahaya lebih berfluktuasi pada tempat terbuka dibanding di tepi dan di dalam hutan (Gambar-2.9a). Pada siang hari kurva radiasi di tempat terbuka berbentuk lonceng, tapi tidak menentu pada tepi, karena sebagian cahaya matahari terhalang oleh kanopi pohon (Chen *et al.*, 1993). Bertambahnya tutupan awan menyebabkan radiasi yang diterima menjadi lebih kecil. Fluktuasi local pola radiasi matahari mengikuti kondisi langit (cerah atau berawan); fluktuasi di tempat terbuka lebih tinggi dibanding di tepi dan di dalam hutan.



Gambar-2.9. Perubahan harian kecepatan angin di tempat terbuka, di tepi dan di dalam hutan pada saat bertiup kencang dan lemah (a), dan kuat penerangan di tempat terbuka, di tepi dan di dalam hutan pada keadaan cerah dan berawan sebagian (b) (sumber: Chen *et al.* , 1993)

Hasil-hasil penelitian mengungkapkan bawa perubahan spasial suhu udara, kelembaban udara, suhu tanah, kelembaban tanah dan kecepatan angin bervariasi secara eksponensial, terjal di tepi hutan dan kemudian menjadi landai ke tengah hutan. Hasil-hasil penelitian juga mengungkapkan bahwa di tepi hutan (batas hutan dengan tempat terbuka) variable-variable iklim mikro lebih berfluktuasi dibandingkan di bagian dalam hutan. Gambar-2.10 memperlihatkan grafik perubahan varians suhu udara, kelembaban udara, suhu tanah, kelembaban tanah dan kecepatan angin yang berubah secara eksponensial (negative) menurut jarak dari tepi ke tengah hutan. Perubahan varians berbentuk eksponensial membuktikan bahwa variasi spasial variable-variable iklim mikro tersebut juga berbentuk eksponensial negative. Disini nilai varians menurut jarak ($\Delta T/\Delta x$) tidak lain adalah nilai gradient fungsi spasial variable iklim mikro. Kita dapat memperoleh model fungsi perubahan spasial (T_x) dari fungsi gradient ($GT(x)$), dan sebaliknya) berdasarkan hubungan:

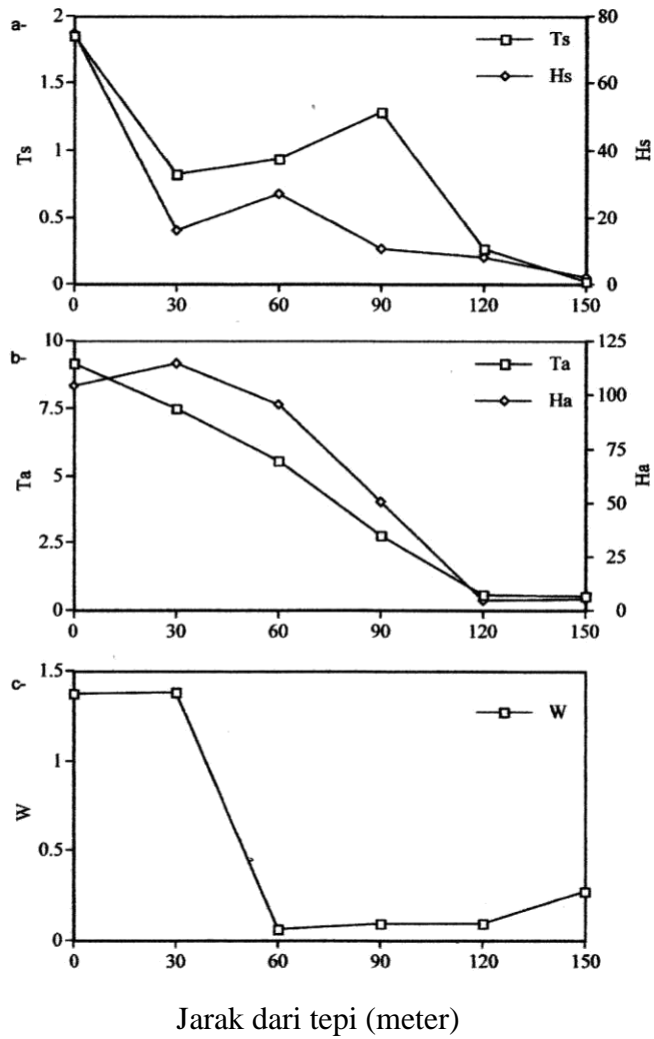
$$GT(x) = dT(x)/dx \dots\dots\dots(2-51)$$

atau

$$T(x) = \int GT(x).dx \dots\dots\dots(2-52)$$

Dimana x adalah jarak dari tepi hutan ke tengah hutan. Jika T(x) berbentuk fungsi eksponensial, maka turunannya terhadap jarak dalam hal ini gradient juga berbentuk fungsi eksponensial. Sebaliknya, integrasi fungsi gradient yang berbentuk eksponensial akan menghasilkan fungsi spasial berbentuk eksponensial

Hasil-hasil penelitian iklim mikro dalam ekosistem hutan dan hutan mangrove sangat bervariasi dan kompleks. Variasi parameter-parameter kuantitatif iklim mikro seperti harga maksimum, selisih maksimum harga variable antara tepi dengan dalam hutan, gradient di tepi dan kedalaman efek tepi berkaitan dengan struktur ekosistem hutan (terutama struktur kanopi dan topografi) dan kondisi lingkungan berbatasan. Variasi ini memperkuat teori bahwa perubahan temporal dan spasial iklim mikro merupakan efek difusi termal antara ekosistem hutan dengan lingkungan dan antara komponen dalam ekosistem, misalnya antar tambalan dalam ekosistem hutan. Kondisi struktur ekosistem akan menentukan pola aliran fluks termal (tunak atau tak tunak karena adanya turbulensi atau sumber termal dalam ekosistem). Variasi kondisi lingkungan menjadi syarat atau kondisi batas dan kondisi awal dari fluks termal dalam ekosistem hutan. Kendatipun kenyataan di lapangan, iklim mikro bervariasi kompleks antar ekosistem bahkan antar transek dalam satu ekosistem, namun pola umum perubahan temporal berbentuk sinusoidal dan perubahan spasial berbentuk eksponensial, ditemui pada setiap hasil penelitian. Sekali lagi ini merupakan bukti dari proses difusi cahaya dan difusi termal yang berlangsung dalam ekosistem.



Gambar-2.10. Perubahan spasial (varians) suhu dan kelembaban tanah (a), suhu dan kelembaban udara (b) dan kecepatan angin (sumber: De Siqueira *et al*, 2004)

Rangkuman

1. Konduksi dan Difusi Termal

Konduksi dan difusi termal mendeskripsikan perpindahan atau aliran energy termal dari satu posisi ke posisi lain dalam bahan, materi, atau dalam ekosistem hutan. Konduksi termal adalah istilah yang digunakan untuk aliran tunak, sedangkan difusi termal digunakan untuk aliran tak tunak.

2. Persamaan Difusi Termal

- Persamaan difusi termal berbentuk persamaan diferensial parsial dalam domain waktu dan ruang atau posisi. Persamaan diferensial parsial difusi termal dapat disederhanakan dan dinyatakan dalam bentuk satu dimensi apabila perubahan spasialnya hanya atau dapat diasumsikan hanya dalam satu arah.
- Syarat batas dan syarat awal untuk mendapatkan solusi persamaan difusi termal dan harga energy termal pada setiap posisi dalam bahan atau materi atau ekosistem hutan, sangat bervariasi. Kondisi batas difusi termal dalam ekosistem hutan berkaitan dengan kondisi lingkungan yang berbatasan dengan ekosistem. Kondisi internal yang mempengaruhi difusi termal dalam ekosistem hutan, terutama adalah kondisi topografi dan struktur kanopi (homogeny, tidak homogeny atau adanya tambalan)
- Bentuk solusi persamaan difusi termal bergantung pada kondisi internal system (bahan, materi atau hutan) dan kondisi batas serta kondisi awal terjadinya fluks termal. Bentuk dasar solusi persamaan difusi termal mengandung komponen spasial yang berubah secara eksponensial dan komponen temporal yang berubah periodic (sinusoidal).

3. Difusi Termal dalam Eksositem Hutan dan Hutan Mangrove

Difusi termal dalam ekosistem hutan terukur pada variable-variabel iklim mikro: suhu udara, kelembaban udara dan tekanan uap air, suhu tanah, kelembaban tanah. Variabel-variabel ini berubah secara spasial dari tepi ke dalam hutan dalam bentuk fungsi eksponensial, dan berubah secara temporal dalam bentuk fungsi periodic (sinusoidal).

Selain variable iklim mikro yang perubahannya diakibatkan oleh difusi termal, variable iklim mikro lainnya yakni intensitas cahaya atau kuat penerangan matahari mendeskripsikan difusi radiasi cahaya dalam ekosistem hutan.

Tugas berkelompok

1. Buatlah rangkuman disertai bagan atau skema yang mendeskripsikan penerimaan radiasi matahari oleh permukaan bumi, proses terjadinya emisi radiasi termal dan difusi termal.
2. Bandingkan dan jelaskan fenomena: (a) udara terasa lebih hangat pada saat beawan dibanding saat langit cerah, (b) gunung berapi memancarkan cahaya dan memperlihatkan dampak hangusnya pepohonan di sekitar, (c) cahaya yang memancar saat seseorang mengelas logam
3. Faktor apa saja yang menentukan fluks termal dalam hutan?
4. Buatlah rangkuman tentang perumusan persamaan diferensial parsial difusi termal dalam batang logam, berbagai kondisi batas dan kondisi awal serta solusi (fungsi eigen dan nilai eigen)
5. Asosiasikan persamaan diferensial parsial difusi termal dalam logam dengan difusi termal dalam ekosistem hutan. Hubungkan variable-variabel persamaan, kondisi batas dan kondisi awal yang berlaku pada contoh-contoh yang diberikan.
6. Berikan penjelasan hubungan antara solusi persamaan diferensial difusi termal dalam logam dengan perubahan temporal dan spasial variable suhu udara, kelembaban udara, suhu tanah, dan kelembaban tanah.
7. Jelaskan difusi radiasi matahari dalam hutan dan perbedaannya dengan difusi termal yang terukur dalam suhu udara sepanjang transek memotong batas hutan dengan tempat terbuka
8. Rumuskan kondisi batas dan kondisi awal perubahan suhu udara di bawah kanopi dalam ekosistem hutan lebat, yang sangat lebar dan sangat panjang. Pada kondisi tanpa radiasi matahari (jam 06.00) suhu udara adalah 20°C , sedangkan suhu puncak pada saat matahari di atas katulistiwa adalah 36°C . Perubahan suhu udara mengikuti perubahan elevasi matahari. Apa makna: hutan lebat homogeny, sangat lebar dan sangat panjang dalam penetapan syarat batas difusi termal?
9. Jelaskan apakah valid jika seorang meneliti hutan lebat dan homogen yang ramping (lebar 50 m) tapi panjang dengan memilih transek di tengah sejajar tepi panjang hutan, dan menggunakan pemodelan difusi satu dimensi

3. PENELITIAN IKLIM MIKRO HUTAN DAN HUTAN MANGROVE



3.1. Definisi Iklim Mikro dan Karakteristik Iklim Mikro Hutan

Iklim mikro didefinisikan dengan penekanan yang berbeda sesuai kepentingan atau bidang kajian. Davies-Colley *et al* (2000) mengutip Oke (1978) mengemukakan bahwa iklim mikro dapat didefinisikan sebagai iklim dalam skala kecil misalnya antara 0.01 hingga 1000 m. Definisi iklim mikro dalam Britannica Encyclopedia adalah: kondisi iklim pada area yang sangat kecil, pada posisi beberapa kaki di atas permukaan bumi dan di bawah kanopi vegetasi. Definisi iklim mikro menurut Wikipedia adalah zona atmosfer local dimana kondisi iklimnya berbeda dengan lingkungan sekitar. Dalam beberapa buku literatur dan artikel penelitian, iklim mikro didefinisikan sebagai area kecil yang memiliki kondisi iklim khusus dan berbeda dengan wilayah sekitarnya.

Definisi iklim mikro menunjuk pada ukuran beberapa kaki persegi saja atau dapat mencapai ukuran beberapa mil persegi. Sebagai contoh, batasan iklim mikro dapat diberlakukan pada tubuh air yang dapat mempengaruhi iklim lokal menjadi dingin, atau pada lokasi pemukiman yang padat dimana terdapat bangunan dan jalan aspal yang menyerap energi matahari, menaikkan panas dan meradiasi kembali panas, sehingga mempengaruhi udara yang segar dst. Iklim mikro dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti: suhu, kelembaban, kecepatan angin, embun, salju, kesetimbangan panas, evaporasi, sifat alam tanah dan vegetasi, topografi lokal, lintang, ketinggian, dan musim. Cuaca dan iklim dipengaruhi oleh kondisi iklim mikro, khususnya oleh variasi karakteristik permukaan. Ogunsoye and Prucnal-Ogunsoye (2002), mengemukakan bahwa iklim mikro menunjuk pada area dengan skala spasial 1 km horizontal dan 100 meter vertical. Iklim mikro dipengaruhi oleh bangunan, pohon dan pola aliran angin. Iklim mikro dapat diatur dengan perancangan bentang alam sedemikian rupa sehingga terjadi reduksi beban termal dalam bangunan dan bagi penghuninya. Dalam buku ini iklim mikro didefinisikan sebagai iklim dalam satu area hutan yang dibatasi oleh fitur-fitur ekologis sedemikian rupa sehingga berbeda dengan lingkungan yang berbatasan.

Iklim mikro dikendalikan oleh radiasi matahari sebagai sumber energi cahaya yang kemudian dirubah sebagiannya menjadi energi termal oleh fitur-fitur ekologis local. Iklim mikro merupakan bagian dari iklim global; iklim mikro dipengaruhi oleh iklim global dan sebaliknya iklim global ditentukan oleh iklim mikro. Dalam Bab II telah dibahas bahwa komponen ekosistem dapat menyerap dan mengemis radiasi termal, yang akhirnya mempengaruhi iklim global.

Iklim mikro di bawah kanopi hutan telah banyak diteliti sejak beberapa tahun lalu, antara lain oleh Reifsnnyder and Lull (1965) dan Jarvis *et al.* (1976) dalam Moore *et al.* (2005), McCaughey *et al.* (1997), Chen *et al.* (1999), Meyer *et al.* (2001); Ramos and Santos (2006), Rambo and North (2008). Iklim mikro hutan

terutama di pengaruhi oleh struktur vegetasi dan tutupan kanopi. Tutupan kanopi mereduksi radiasi matahari, presipitasi dan kecepatan angin (Moore *et al.*, 2005). Selain mereduksi intensitas radiasi cahaya, kanopi hutan mengubah distribusi spectral cahaya, karena daun mengabsorpsi dan memantulkan energi cahaya pada panjang gelombang yang berbeda-beda (Atzet and Waring, 1970; Yang *et al.*, 1993). Kanopi lebat dapat mereduksi lebih 90 % radiasi cahaya masuk (Young and Mitchell, 1994; Chen *et al.*, 1995; Brosofske *et al.*, 1997; Davies-Colley *et al.*, 2000). Bagian energi radiasi cahaya yang ditransmisi melalui celah daun dan mencapai tanah bergantung pada tinggi tajuk dan kerapatan serta susunan daun (Federer, 1971; Black *et al.*, 1991). Bagian energi radiasi cahaya yang diserap diubah menjadi energi panas latent dan panas sensible. Pada suhu sekitar 27^oC, obyek yang ada di permukaan bumi mulai memancarkan radiasi termal yang puncaknya berada pada saluran inframerah. Semakin tinggi suhu obyek, puncak radiasi energi yang dipancarkan semakin bergeser ke saluran (spectrum elektromagnet) dengan panjang gelombang lebih pendek.

Kemampuan kanopi mereduksi radiasi cahaya, secara langsung mengendalikan emisi termal oleh tanah atau air atau obyek lain yang berada di bawah kanopi. Emisi termal oleh permukaan lahan di bawah kanopi menjadi berbeda signifikan dengan lingkungan berbatasan, misalnya lahan terbuka, jalan aspal, laut, area pemukiman dll. Kanopi hutan menjadi faktor pembatas ekosistem hutan dan iklim mikro hutan, karena mengendalikan energi radiasi cahaya dan energi termal yang diemisi oleh ekosistem. Kanopi hutan juga mengendalikan difusi termal antara ekosistem dengan lingkungan dan antar komponen ekosistem hutan (misalnya antar tambalan dalam hutan)

Variabel iklim mikro yang terkait atau menjadi indikator energi radiasi cahaya adalah intensitas cahaya atau kuat penerangan matahari, kelembaban udara, suhu tanah, dan kelembaban tanah. Kanopi hutan mengurangi presipitasi yang masuk ke dalam tanah dan melalui evapotranspirasi. Besarnya pengurangan presipitasi yang masuk ke dalam tanah bervariasi antara 10 hingga 30 % dari total presipitasi tahunan (McCaughey *et al.*, 1997; Pomeroy and Goodison, 1997; Spittlehouse, 1998). Bagian presipitasi yang masuk ke tanah juga berkurang dengan meningkatnya kecepatan angin dan intensitas penyinaran.

Angin merupakan variabel iklim yang mempengaruhi variabel iklim mikro hutan seperti suhu udara, kelembaban udara, suhu tanah dan kelembaban tanah (Davies-Colley *et al.*, 2000). Kanopi hutan berperan mereduksi kecepatan angin menjadi 10 hingga 20 % dari kecepatan di tempat terbuka (Raynor, 1971; Chen *et al.*, 1995; Davies-Colley *et al.*, 2000). Semakin jauh ke tengah hutan dari tepi, pengurangan kecepatan angin semakin besar. Kanopi hutan mangrove berperan mengendalikan emisi dan difusi termal dan secara langsung mengendalikan variabel iklim mikro: suhu udara, kelembaban udara, suhu tanah/air, kelembaban tanah. Pengaruh kanopi terhadap angin, secara tidak langsung

mempengaruhi variabel iklim mikro lainnya. Struktur hutan dan fungsi kanopi hutan mengendalikan iklim mikro, merupakan karakteristik iklim mikro hutan. Beberapa hasil penelitian, mengungkapkan fungsi kanopi hutan dalam mengendalikan variabel iklim mikro.

Fungsi kanopi hutan mereduksi perubahan suhu udara harian dibuktikan oleh pola perubahan suhu udara siang hari dalam hutan yang sama namun konsisten lebih rendah dari suhu udara di luar hutan (Young and Mitchell, 1994; Chen *et al.*, 1995; Cadenasso *et al.*, 1997; Brosofske *et al.*, 1997; Davies-Colley *et al.*, 2000; Spittlehouse *et al.*, 2004). Pada malam hari, suhu udara dalam hutan lebih rendah dibanding suhu udara di atas lahan terbuka (Chen *et al.*, 1995; Spittlehouse *et al.*, 2004) membuktikan peran kanopi mengendalikan energi termal yang tersimpan dalam hutan selama emisi dan difusi termal pada siang hari. Pada siang hari, kelembaban relatif dalam hutan berkisar 5 hingga 25% lebih tinggi dari tempat terbuka (Chen *et al.*, 1995; Brosofske *et al.*, 1997; Davies-Colley *et al.*, 2000; Spittlehouse *et al.*, 2004). Fungsi kanopi hutan mereduksi suhu tanah dibuktikan dengan kesamaan pola perubahan harian suhu tanah di bawah kanopi dengan tempat terbuka, namun pada siang hari, suhu tanah di bawah kanopi hutan lebih rendah 10 sampai 15°C. Pada malam hari suhu tanah di bawah kanopi hutan lebih tinggi 1 sampai 2°C dari tempat terbuka (Chen *et al.*, 1995; Brosofske *et al.*, 1997; Spittlehouse *et al.*, 2004).

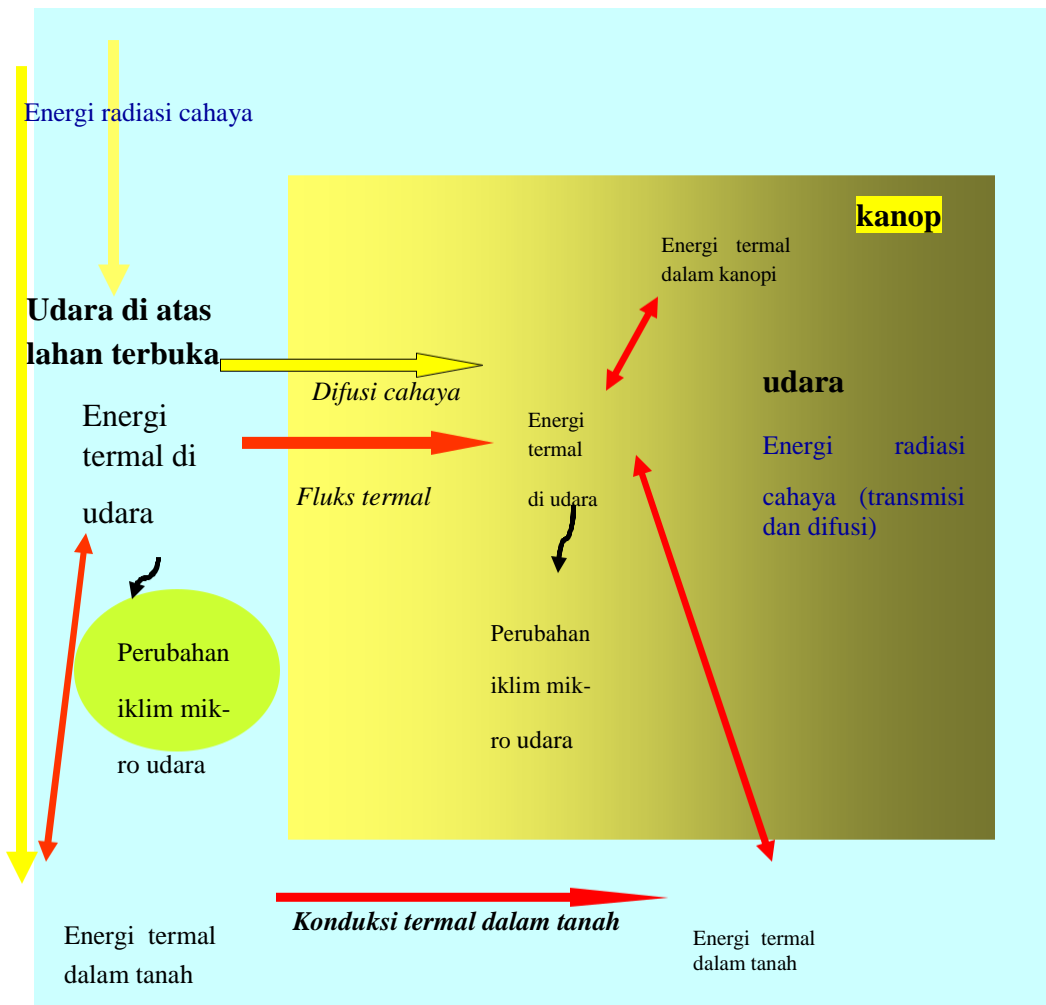
3.2. Skema Perubahan Iklim Mikro Harian dalam Hutan dan Hutan Mangrove

Hasil-hasil penelitian membuktikan bahwa variabel-variabel iklim mikro dalam ekosistem hutan berfluktuasi secara periodic dengan periode 24 jam (Chen *et al.*, 1999; Chen and Franklin, 1997; Davies Colley *et al.*, 2000), kecuali intensitas radiasi cahaya yang periodenya 12 jam. Kendatipun ada perubahan cuaca seperti panas menjadi hujan, namun pola perubahan variabel iklim mikro tetap menunjukkan bentuk periodic sinusoidal (Chen *et al.* 1993; Davies-Colley *et al.*, 2000). Fenomena ini disebabkan oleh faktor utama yang mengendalikan iklim mikro adalah energi radiasi cahaya matahari yang diterima permukaan bumi (Malanson and Carins, 1995; Moore *et al.*, 2005). Dalam Bab-2 telah diuraikan tentang difusi radiasi cahaya dan difusi termal yang terjadi di permukaan bumi. Efek difusi radiasi elektromagnetik (radiasi cahaya dan radiasi termal) terhadap iklim mikro secara skematik disajikan pada Gambar-3.1.

Perubahan iklim mikro dalam ekosistem hutan dan lingkungan sekitarnya dikendalikan oleh radiasi matahari (puncaknya pada spectrum tampak mata) yang jatuh ke permukaan bumi. Sebagian radiasi matahari dipantulkan oleh permukaan bumi sebagai albedo, dan sebagiannya diserap kemudian dirubah menjadi energi panas latent dan energi panas sensible. Energi radiasi cahaya yang mencapai tanah di bawah kanopi hutan meliputi transmisi langsung dari

celah kanopi, difusi yang dihasilkan oleh hamburan dan pantulan berulang oleh kanopi (Ringold *et al.*, 2003; Dignan and Bren, 2003) dan difusi horizontal oleh partikel udara dari tepi ke dalam hutan (Sridhar *et al.*, 2004; Moore *et al.*, 2005).

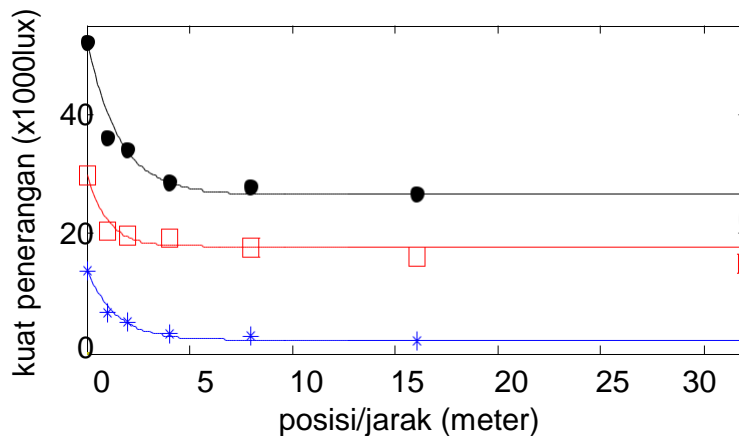
Energi yang diserap permukaan bumi akan menaikkan suhu permukaan bumi, dan pada suhu sekitar 300 K ($\pm 27^{\circ}\text{C}$), obyek di permukaan bumi memancarkan radiasi termal. Radiasi termal yang dipancarkan bersifat kontinum dalam spektrum radiasi elektromagnetik, namun puncak radiasinya berada pada spectrum inframerah. Perbedaan kapasitas panas jenis dan kerapatan massa obyek atau benda, menyebabkan perbedaan dalam menyerap energi cahaya, dan yang dirubah menjadi energi termal.



Gambar-3.1. Skema difusi radiasi tampak mata dan difusi termal serta pengaruhnya terhadap perubahan iklim mikro ekosistem hutan dan lingkungan

Selain sifat termal obyek atau benda, kuantitas emisi termal sangat ditentukan oleh kuantitas energi cahaya yang jatuh pada benda. Semakin besar energi cahaya yang diterima semakin besar pula proporsi energi yang dirubah menjadi energi termal, yang berarti semakin tinggi emisi radiasi termal oleh benda yang bersangkutan.

Wolanski (2008) mengemukakan bahwa kanopi mangrove mereduksi radiasi cahaya sehingga hanya 10 % yang mencapai permukaan tanah. Örländer and Langvall (1993) dan Spittlehouse *et al.* (2004) mengutip Reifsnnyder and Lull (1965), mengemukakan bahwa kerapatan kanopi sekitar 90% mereduksi cahaya sebesar 50–70% dari radiasi di tempat terbuka. Transmisi radiasi matahari di bawah kanopi bergantung pada ketinggian dan kerapatan tajuk, serta susunan elemen-elemen daun (Black *et al.*, 1991; Canham *et al.*, 1999; Spittlehouse, 2004). Udara di bawah kanopi memperoleh energi cahaya langsung melalui celah kanopi, difusi vertical dan difusi horizontal di bawah kanopi. Semakin tinggi tutupan kanopi (*canopy cover*), cahaya langsung dan difusi cahaya pada arah vertical semakin kecil. Difusi horizontal pada arah tegak lurus batas hutan membentuk pola eksponensial dari tepi ke tengah hutan (lihat Gambar-3.2.).



Gambar-3.2. Reduksi kuat penerangan (cahaya matahari) menurut jarak dari tepi hutan, pada jam 06.00 (warna biru), jam 12.00 (warna hitam) dan jam 17.00 (warna merah). Lokasi: hutan mangrove di teluk Talengen, tanggal pengambilan data 2 Juni 2011, keadaan cuaca cerah

Bagian tepi memperoleh radiasi matahari lebih besar dan semakin menurun ke tengah hutan (Geiger *et al.*, 1995 dalam Moore *et al.*, 2005; ; McCaughey *et al.*, 1997; Chen *et al.*, 1999; Spittlehouse *et al.*, 2004).

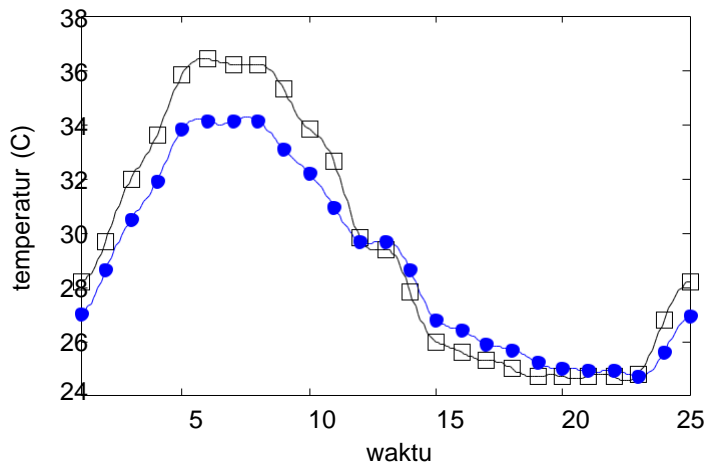
Gambar-3.2. juga memperlihatkan bahwa perbedaan kuat penerangan (atau intensitas cahaya) antara bagian tepi dengan bagian dalam hutan mangrove bervariasi menurut waktu (elevasi matahari). Pada jam 06.00, perbedaannya sangat rendah dibanding jam 12.00. Sore hari (jam 17.00) perbedaan kuat

penerangan antara tepi dengan bagian dalam hutan kembali menurun dan kemudian menjadi sama ketika matahari terbenam.

Radiasi cahaya yang rendah di bawah kanopi menyebabkan emisi termal oleh benda di bawah kanopi lebih rendah di banding di tempat terbuka. Emisi termal oleh obyek di bawah kanopi lebih rendah, mengakibatkan kenaikan energi termal udara di bawah kanopi lebih lambat dibanding di tempat terbuka. Pagi hingga sore hari energi termal di bawah kanopi lebih rendah dibanding tempat terbuka. Pada malam hari, energi termal di bawah kanopi dapat lebih tinggi di banding tempat terbuka, karena energi termal terkurung kanopi. Hal ini bergantung pada kondisi lingkungan berbatasan dengan hutan. Gehlhausen *et al.* (2000) mengemukakan bahwa tepi hutan yang berbatasan dengan lahan pertanian iklim mikronya lebih berfluktuasi dibanding yang berbatasan dengan pohon. Untuk hutan yang berbatasan dengan pemukiman yang padat, suhu udara (sebagai indikator energi termal) dalam hutan lebih rendah dari suhu udara dalam pemukiman (Kompeneers, 1978, dalam Godefroid and Koedam, 2003). Di tempat terbuka, pada saat matahari terbenam, energi termal menurun drastic sedangkan di bawah kanopi menurun secara perlahan.

Gambar-3.1. memperlihatkan bahwa energi termal menyebabkan perubahan iklim mikro di sekitarnya. Variasi energi termal udara dari luar ke dalam hutan, menyebabkan variasi spasial iklim mikro seperti suhu udara, kelembaban udara, suhu tanah dan kelembaban tanah. Gambar-3.3 memperlihatkan grafik perubahan harian suhu udara di tempat terbuka (di atas permukaan laut, pada jarak 4 m dari tepi) dan di bawah kanopi mangrove pada jarak 32 meter dari tepi. Pengukuran dimulai jam 06.00 (posisi 0 dalam Gambar-3.3) tanggal 2 Juni 2011 hingga jam 06.00 (posisi 25) tanggal 3 Juni 2011. Gambar-3.3. menunjukkan bahwa perubahan harian suhu udara berbentuk sinusoidal dengan periode 24 jam.

Fluktuasi suhu udara dalam hutan mangrove lebih rendah dibanding suhu udara di tempat terbuka. Hal ini berkaitan dengan fluktuasi energi termal di tempat terbuka yang lebih tinggi dibanding di bawah kanopi mangrove. Sejak pagi hingga sekitar jam 18.00 (posisi 12 dalam Gambar-3.3), suhu udara di atas permukaan laut terbuka lebih tinggi dibanding di bawah kanopi. Pada malam hari suhu udara di bawah kanopi mangrove lebih tinggi dibanding suhu udara di atas permukaan laut terbuka. Pola perubahan suhu udara yang disajikan pada Gambar-3.3 bersesuaian dengan hasil penelitian Mazda and Wolanski (2009), tentang suhu udara dan suhu tanah di bawah kanopi mangrove. Pola perubahan suhu udara di bawah hutan mangrove, sama dengan yang terjadi dalam hutan di daratan (Chen *et al.*, 1995).



Gambar-3.3. Perubahan harian suhu udara di tepi mangrove (kurva warna hitam) dan di bawah kanopi mangrove (kurva warna biru). Lokasi: hutan mangrove di teluk Talengen, tanggal pengambilan data 2 – 3 Juni 2011, keadaan cuaca cerah

Perubahan struktur kanopi menyebabkan perubahan iklim mikro di bawah kanopi (Gladstone and Schreider, 2003; Morrissey *et al.*, 2007; Nelson *et al.*, 2007). Perubahan iklim mikro ini disebabkan oleh perubahan energi termal akibat perubahan tingkat penetrasi radiasi cahaya ke bawah kanopi. Fluktuasi harian variabel iklim mikro menunjukkan pola yang bersesuaian satu sama lain (misalnya selajan, antara suhu tanah dengan suhu udara; atau kebalikan, antara suhu udara dan kelembaban udara) akibat fluktuasi energi termal. Hawley (2010) mengemukakan bahwa suhu air sangat kuat dipengaruhi oleh jumlah energi yang menembus atau diterima langsung oleh permukaan air.

3.3. Pentingnya Karakterisasi Iklim Mikro Ekosistem Hutan

Pada bagian 3.2. telah diuraikan pengaruh radiasi matahari dan energi termal terhadap iklim mikro. Perbedaan komponen ekosistem menyebabkan perbedaan absorbs cahaya dan perubahan proporsi energi cahaya menjadi panas laten dan panas sensible. Perbedaan radiasi termal oleh komponen-komponen ekosistem, menyebabkan kuantitas dan perubahan harian iklim mikro bersifat khusus untuk ekosistem yang bersangkutan. Besaran parameter iklim mikro hutan mangrove berbeda dengan hutan di daratan. Kendati demikian, secara konseptual, pola perubahan harian variabel iklim mikro di hutan mangrove sama dengan di hutan, karena dikendalikan oleh radiasi matahari (Mazda and Wolanski, 2009).

Berbeda halnya dengan penelitian iklim mikro hutan yang telah banyak dilakukan sejak beberapa tahun lalu, penelitian iklim mikro hutan mangrove sangat terbatas. Wolanski (2008) mengemukakan bahwa penelitian proses-proses fisis hutan mangrove tergolong kurang dibanding penelitian aspek biologinya. Penelitian proses fisis juga lebih ditekankan pada hidrodinamika

mangrove, sedangkan berkaitan dengan variabel penyinaran matahari, suhu udara, kelembaban udara, kecepatan angin, suhu tanah belum banyak dilakukan. Penelitian tentang dinamika hutan mangrove selama ini berfokus pada perubahan spasial ekosistem mangrove (Lucas *et al.*, 2002; Cohen and Lara, 2003; Fromard *et al.*, 2004; Hernandez-Cornejo *et al.*, 2005; Dahdouh-Guebas and Koedam, 2008), pergeseran komposisi species (Wang *et al.*, 2004; Dahdouh-Guebas *et al.*, 2005) dan perubahan tutupan mangrove sebelum dan sesudah kerusakan alamiah (Smith *et al.*, 1994; Krauss *et al.*, 2005). Dalam beberapa tulisan antara lain Ellison and Stoddart (1991), Snedaker (1995), Gilman *et al.*, (2006), Graneg and Ruitenberg, (2008), pembahasan iklim mikro hutan mangrove hanya merupakan bagian dari prediksi perubahan iklim global dan dampaknya seperti kenaikan suhu dan permukaan air laut.

Seperti telah banyak dilakukan untuk hutan di daratan, karakterisasi iklim mikro hutan mangrove mendeskripsikan kondisi ekosistem dan interaksi dengan lingkungan berbatasan. Kuantitas, dinamika dan perubahan spasial variabel-variabel iklim mikro merupakan identitas kondisi ekosistem dan perubahan yang terjadi dalam ekosistem maupun lingkungannya. Pengaruh radiasi cahaya dan energi termal yang diindikasikan oleh variabel-variabel iklim mikro, juga mempengaruhi penyebaran benih dan pertumbuhan mangrove (Gladstone and Schreider, 2003; Morrissey *et al.*, 2007), keberadaan dan pergerakan organisme di dalam hutan mangrove dan sekitarnya (Wolanski, 2008; Luther and Greenberg, 2009; Rajpar and Zakaria, 2011). Kita dapat membandingkan dua foto hutan mangrove (Gambar-3.4 dan Gambar-3.5) berikut ini:



Gambar-3.4. Kenampakan hutan mangrove yang bertumbuh subur.

Gambar-3.4. menunjukkan kondisi hutan mangrove yang sehat, bertumbuh subur secara alamiah, sedangkan Gambar-3.5. menunjukkan hutan mangrove yang sudah rusak. Variabel dan parameter-parameter iklim mikro kedua hutan mangrove sangat berbeda. Misalnya penetrasi cahaya yang terukur pada kuat

penerangan cahaya di bawah kanopi. Penetrasi cahaya ke bawah kanopi hutan mangrove pada Gambar-3.5 lebih tinggi dibanding hutan mangrove pada gambar-3.4.



Gambar-3.5. Kenampakan hutan mangrove yang sudah rusak.

Penetrasi cahaya ini selanjutnya menentukan kuantitas dan perubahan energi termal di bawah kanopi. Perbedaan energi termal antara bagian luar dengan bagian dalam hutan mangrove dan difusi termal, menentukan kuantitas, fluktuasi harian, dan perubahan spasial variabel iklim mikro. Perbedaan suhu udara luar dan di dalam hutan mangrove, lebih besar untuk hutan mangrove pada Gambar-3.4. Hal ini disebabkan kanopi mangrove pada Gambar-3.4. lebih rapat, sehingga lebih besar mereduksi penetrasi radiasi cahaya, lebih kuat mereduksi fluktuasi energi termal dan fluktuasi suhu udara di bawah kanopi. Nilai maksimum kelembaban udara di bawah kanopi lebih tinggi untuk hutan mangrove pada Gambar-3.4. Kanopi yang lebat, lebih besar mereduksi penetrasi radiasi cahaya sehingga mencegah peningkatan energi termal yang dapat menyebabkan pemanasan udara dan penurunan kelembaban. Gradien maksimum suhu udara pada batas atau tepi mangrove, lebih tinggi untuk hutan mangrove pada Gambar-3.4. Penurunan energi termal sepanjang transek memotong tepi hutan, lebih besar pada hutan dengan kanopi yang lebat (Gambar-3.4) sehingga gradien suhu udara di tepi hutan lebih terjal dibanding hutan mangrove pada Gambar-3.5. Hal yang sama terjadi pada variabel dan parameter iklim mikro lainnya.

Perubahan besaran parameter-parameter iklim mikro (misalnya: selisih besaran parameter di luar dan di dalam hutan, gradien, kedalaman efek tepi dll), serta variasi temporal dan spasial iklim mikro menunjukkan perubahan lebih awal sebelum terjadinya perubahan signifikan pada struktur hutan mangrove. Iklim mikro langsung berubah jika terjadi perubahan penyinaran atau peningkatan energi termal dalam ekosistem hutan, sebelum terjadi perubahan struktur hutan secara alamiah. Sebaliknya, perubahan struktur hutan secara mendadak

(misalnya karena penebangan pohon) secara langsung akan mengubah iklim mikro. Menurut Morrisey *et al.* (2007) dan Gradstein (2008), variabel iklim mikro (dan parameter-parameter iklim mikro) sangat peka terhadap perubahan struktur hutan mangrove, oleh karena itu karakterisasi iklim mikro hutan mangrove sangat dibutuhkan untuk pemantauan dini perubahan ekosistem hutan mangrove maupun perubahan pengaruh lingkungan berbatasan. Krauss *et al.* (2008) mengemukakan bahwa informasi detail tentang pengaruh suhu terhadap pertumbuhan awal dan fisiologi mangrove masih sangat terbatas. Para ahli seperti Wattayakorn *et al.* (1990), Mazda *et al.* (1990), Mederios and Kjervfe (1993), Hollins and Ridd (1997), Ridd and Stieglitz (2002) menekankan pentingnya studi iklim mikro hutan mangrove dan lingkungannya. Krauss *et al.* (2008), mengemukakan bahwa kedepan, penelitian untuk mengidentifikasi ambang suhu (dan variabel iklim mikro lainnya) serta pengaruhnya terhadap struktur dan fungsi ekologis ekosistem mangrove, sangat penting terkait dengan pemanasan global

Walaupun kondisi ekosistem hutan mangrove berbeda dengan hutan di daratan, namun studi tentang karakteristik iklim mikro hutan mangrove dapat dibandingkan dan diadopsi dari studi karakteristik iklim mikro ekosistem hutan. Beberapa studi yang menunjukkan pentingnya karakterisasi iklim mikro ekosistem hutan antara lain sebagai berikut:

3.3.1. Variabel iklim mikro sebagai indikator perubahan energi cahaya dan energi termal dalam hutan

Perubahan iklim mikro hutan pada dasarnya disebabkan oleh perubahan intensitas cahaya atau kuat penerangan matahari. Perubahan intensitas cahaya atau kuat penerangan menyebabkan perubahan energi termal dan difusi termal dalam ekosistem dan antara ekosistem dengan lingkungan. Spittlehouse *et al.* (2004) mengemukakan bahwa iklim mikro merupakan hasil penyerapan dan pelepasan energi serta presipitasi pada permukaan bumi.

Perubahan energi termal ini dapat diukur dan dianalisis berdasarkan perubahan kuat penerangan dan variabel iklim mikro lainnya seperti suhu udara dan tanah, kelembaban udara dan tanah. Pengaruh difusi termal bervariasi dan dapat dianalisis berdasarkan parameter kuantitatif iklim mikro seperti: harga maksimum, beda harga maksimum variabel iklim mikro antara lingkungan, tepi hutan dan posisi dalam hutan, beda maksimum siang dan malam, gradien di tepi, kedalaman efek tepi, time-lag antar variabel, dinamika gradien iklim mikro. Secara skematis, kedudukan variabel dan parameter kuantitatif iklim mikro dalam perubahan ekosistem dan lingkungan disajikan pada Gambar-3.6.

Gambar-3.6. menunjukkan kedudukan variabel dan parameter iklim mikro sebagai indikator perubahan ekosistem hutan. Bagian (a) menunjukkan kondisi awal hutan yang dapat dikarakterisasi menurut pola dan fluktuasi temporal (harian) variabel iklim mikro, perubahan spasial variabel iklim mikro dan harga-harga parameter iklim mikro. Perubahan kondisi internal ekosistem maupun lingkungan, menyebabkan perubahan penerimaan intensitas radiasi cahaya dan

perubahan emisi dan difusi termal. Penebangan pohon dapat menyebabkan penurunan tutupan kanopi dan meningkatkan penetrasi radiasi cahaya ke tanah di bawah kanopi (*floor*). Peningkatan penetrasi cahaya ke bawah kanopi menyebabkan peningkatan emisi termal komponen ekosistem dan difusi termal antar komponen ekosistem. Peningkatan energi termal ini antara lain terukur melalui peningkatan suhu udara, suhu tanah, suhu air di bawah kanopi, serta penurunan kelembaban udara dan kelembaban tanah. Godefroid *et al* (2006) mengemukakan bahwa pola perubahan iklim mikro sangat erat hubungannya dengan pengaruh difusi termal di udara antara ekosistem hutan dengan lingkungan berbatasan. Pengaruh difusi termal antara ekosistem hutan dengan lingkungannya dibuktikan oleh perbedaan perubahan harian gradien iklim mikro (suhu udara, defisit tekanan uap air, dan kecepatan angin) dalam penelitian yang dilakukan Pohlman *et al.* (2009) di hutan tropis, bagian utara Australia.



Gambar-3.6. Kedudukan variabel dan parameter iklim mikro dalam skema perubahan ekosistem hutan

Perombakan hutan mempersempit area hutan yang berfungsi mengasorbsi energi termal dari lingkungan sekitar, sekaligus memunculkan sumber-sumber energi termal baru yang berdifusi meningkatkan energi termal dalam hutan. Duke (2001), Alongi and de Carvalho (2008) mengemukakan bahwa celah antar kanopi atau pohon menyebabkan peningkatan cahaya dan suhu, laju evaporasi dan transpirasi yang tinggi dari pepohonan yang ada di sekitar celah tersebut.

Perombakan hutan menyebabkan perubahan jangka pendek dan jangka panjang iklim mikro hutan Keller (2005).

Penanaman atau suksesi alamiah pohon dapat mereduksi penetrasi energi cahaya dan dapat mengurangi peningkatan energi termal dalam ekosistem. Perubahan kondisi internal ekosistem yang menyebabkan peningkatan penetrasi radiasi cahaya dan peningkatan energi termal akan menyebabkan perubahan variabel dan parameter iklim mikro (bagian (b), Gambar-3.6). Secara fisis, perubahan yang mungkin terjadi adalah sebagai berikut:

- 1) Pengaruh penebangan pohon atau perombakan hutan terhadap pola perubahan harian intensitas radiasi di bawah kanopi. Penebangan pohon atau perombakan hutan akan meningkatkan intensitas cahaya atau kuat penerangan di bawah kanopi. Peningkatan intensitas cahaya atau kuat penerangan disebabkan oleh peningkatan penetrasi cahaya secara langsung, peningkatan difusi cahaya arah vertical dan horizontal. Peningkatan energi cahaya di bawah kanopi dapat bersifat positif (misalnya untuk organisme yang toleran terhadap cahaya) atau negatif (untuk organisme yang tidak toleran terhadap cahaya). Perubahan intensitas penyinaran di bawah kanopi juga dapat mempengaruhi pertumbuhan bibit pohon. Penanaman pohon atau suksesi alamiah dapat meningkatkan tutupan kanopi dan mengurangi fluktuasi intensitas cahaya atau kuat penerangan di bawah kanopi.
- 2) Pengaruh penebangan pohon atau perombakan area hutan terhadap pola perubahan harian variabel: suhu udara, suhu tanah/air, kelembaban udara, kelembaban tanah/air dalam hutan. Menurunnya tutupan kanopi akibat penebangan pohon menyebabkan peningkatan amplitudo iklim mikro pada siang hari, sedangkan pada malam hari cenderung terjadi penurunan. Peningkatan amplitudo pada siang hari diakibatkan oleh peningkatan penetrasi radiasi cahaya yang menyebabkan peningkatan emisi termal oleh komponen ekosistem dan difusi termal antar komponen ekosistem. Perubahan difusi termal juga terjadi melalui batas ekosistem dengan lingkungan. Perombakan hutan menciptakan area terbuka, dan perampangan area hutan dapat meningkatkan pengaruh difusi termal horizontal terhadap perubahan variabel iklim mikro. Anderson *et al.* (2007) mengemukakan bahwa perampangan area hutan dapat meningkatkan suhu udara sebesar 1 hingga 4 °C. Penurunan amplitudo pada malam hari dapat terjadi karena difusi termal arah vertical, melalui celah kanopi yang lebih terbuka di banding sebelum dilakukan penebangan atau perombakan area hutan.

- Perampangan area hutan juga berpotensi menurunkan besaran iklim mikro pada malam hari akibat peningkatan difusi termal. Difusi termal meningkat karena berkurangnya jarak dari tepi atau terjadi efek tepi ganda antar tambalan berdekatan. Misalnya, pada malam hari, suhu udara dalam hutan yang lebih tinggi dari lingkungan sekitarnya, akan turun karena difusi termal pada arah horizontal (aliran energi termal dari dalam hutan ke lingkungan).
- 3) Perubahan variasi spasial intensitas radiasi cahaya atau kuat penerangan matahari. Variasi spasial berubah dari waktu ke waktu sepanjang siang hari. Pada puncak radiasi (sekitar jam 12.00), perbedaan intensitas radiasi cahaya antara tempat terbuka dengan bagian dalam hutan menjadi lebih kecil dibanding sebelum perombakan atau kerusakan hutan (Zheng *et al.*, 2000; Keller, 2005; Tamatamah, 2007). Hal ini disebabkan peningkatan penetrasi radiasi cahaya ke dalam hutan. Perbedaan intensitas radiasi atau kuat penerangan ini, selain ditentukan oleh perubahan kondisi hutan (misalnya perubahan struktur kanopi), juga bergantung pada kondisi lingkungan berbatasan (Chen *et al.* 1999; Davies-Colley *et al.*, 2000; Newmark W.D. 2001; Pohlman *et al.*, 2007; Mazda and Wolanski, 2009).
 - 4) Perubahan variasi spasial suhu udara, suhu tanah, kelembaban udara, kelembaban tanah. Variasi spasial berubah dari waktu ke waktu sepanjang hari bergantung pada perubahan energi termal dan difusi termal antar komponen ekosistem dan antara ekosistem hutan dengan lingkungan. Perubahan tersebut diakibatkan oleh perubahan penetrasi radiasi matahari dalam hutan dan lingkungan serta perubahan energi termal dalam hutan dan lingkungan. Penebangan pohon atau kerusakan alamiah yang menyebabkan penurunan tutupan kanopi, akan meningkatkan penetrasi radiasi matahari dan meningkatkan energi termal dalam hutan, sehingga cenderung menyebabkan penurunan perbedaan iklim mikro antara hutan dengan lingkungan terbuka. Perbedaan suhu udara misalnya akan menjadi lebih kecil dibanding sebelum terjadi penurunan tutupan kanopi. Perampangan area hutan juga cenderung menyebabkan penurunan variasi spasial dan perbedaan iklim mikro antara lingkungan dan bagian tepi dengan bagian dalam hutan. Hal ini disebabkan oleh peningkatan difusi termal atau penurunan absorpsi energi termal oleh komponen ekosistem karena hutan menjadi lebih ramping.
 - 5) Perubahan gradien intensitas radiasi cahaya atau kuat penerangan matahari pada batas ekosistem hutan. Penurunan tutupan kanopi menyebabkan peningkatan penetrasi radiasi matahari dalam hutan mendekati penetrasiradiasi di lingkungan yang lebih terbuka. Akibatnya perbedaan intensitas radiasi antara tempat terbuka dengan area sekitar tepi hutan menjadi lebih kecil dibanding sebelum penebangan atau perubahan tutupan kanopi
 - 6) Perubahan gradien variabel suhu udara, suhu tanah, kelembaban udara, kelembaban tanah. Peningkatan penetrasi radiasi matahari dan peningkatan energi termal dalam hutan, menyebabkan kondisi iklim mikro tepi hutan mendekati kondisi lingkungan berbatasan, sehingga gradien variabel-

variabel tersebut menjadi lebih landai dibanding sebelum penebangan atau penurunan tutupan kanopi. Perombakan hutan yang menyebabkan perampangan area hutan, juga dapat menyebabkan penurunan gradien variabel iklim mikro karena difusi termal arah horizontal yang terjadi dari berbagai arah (tepi hutan atau tepi tambalan berdekatan).

- 7) Kedalaman efek tepi radiasi matahari. Kedalaman efek tepi berubah dari waktu ke waktu selama siang hari, bergantung pada intensitas radiasi (elevasi matahari), kondisi ekosistem hutan (khususnya tutupan kanopi) dan lingkungan. Walaupun efek tepi ditentukan oleh difusi radiasi matahari dalam arah horizontal dari tepi ke tengah hutan, namun peningkatan penetrasi radiasi cahaya ke bawah kanopi akan mengubah kedalaman efek tepi radiasi matahari. Kedalaman efek tepi cenderung bertambah karena penurunan tutupan kanopi.
- 8) Kedalaman efek tepi variabel suhu udara, suhu tanah, kelembaban udara, kelembaban tanah. Kedalaman efek tepi variabel-variabel tersebut dapat bertambah karena penebangan hutan atau perombakan area serta kerusakan alamiah yang menyebabkan berkurangnya tutupan kanopi. Berkurangnya tutupan kanopi menyebabkan peningkatan penetrasi cahaya yang menyebabkan peningkatan energi termal pada posisi jauh dari tepi ke tengah hutan. Peningkatan energi termal menyebabkan peningkatan suhu udara dan suhu tanah serta menyebabkan penurunan kelembaban udara dan tanah lebih jauh ke tengah hutan.

Gambar-3.6., bagian (c) memperlihatkan kondisi ekosistem hutan yang mengalami pemulihan alamiah. Radiasi cahaya matahari yang masuk dan sebagiannya dirubah menjadi energi panas (latent dan sensible) berada dalam ukuran ideal untuk mengendalikan fungsi-fungsi ekologis komponen-komponen ekosistem. Dalam keadaan demikian, ekosistem akan mengalami pemulihan secara alamiah. Misalnya, jika kombinasi faktor curah hujan, suhu udara, kelembaban udara, suhu tanah dalam rentang ideal maka akan berlangsung pelapukan dedaunan dan bahan organik lainnya. Kondisi fisis ekosistem juga menunjang berperannya mikroorganisme dalam proses pelapukan. Proses pemulihan alamiah ini dapat berlangsung jika intensitas radiasi cahaya dan energi termal tidak melebihi batas kemampuan komponen-komponen ekosistem menerima pasokan energi. Proses ekologis yang terjadi akan disertai perubahan variabel dan parameter iklim mikro. Fluktuasi perubahan suhu udara, suhu tanah, kelembaban udara, dan kelembaban tanah akan berkurang jika tutupan kanopi meningkat. Gradien suhu udara, suhu tanah, kelembaban udara dan kelembaban tanah di batas hutan pada siang hari akan meningkat karena penurunan energi termal pada bagian dalam hutan. Penurunan energi termal pada bagian dalam hutan diakibatkan oleh peningkatan tutupan kanopi yang mereduksi penetrasi radiasi matahari ke bawah kanopi. Absorpsi fluks termal yang berasal dari lingkungan berbatasan meningkat, karena kandungan energi termal komponen ekosistem hutan rendah, sehingga terjadi penurunan drastis

energi termal dekat tepi hutan. Penurunan drastis ini menyebabkan gradien iklim mikro pada tepi hutan meningkat.

Pada malam hari, energi termal dalam hutan lebih tinggi dari lingkungan terbuka. Tutupan kanopi yang rapat mereduksi aliran fluks termal melalui celah kanopi, sehingga energi termal lebih banyak berdifusi melalui batas hutan dengan lingkungan. Difusi termal horizontal dari hutan ke lingkungan menyebabkan gradien variabel iklim mikro lebih terjal dibanding kondisi ekosistem yang tutupan kanopinya rendah. Kedalaman efek tepi variabel iklim mikro cenderung berkurang akibat peningkatan kerapatan kanopi dan kapasitas komponen ekosistem menyerap energi termal yang berdifusi melalui tepi hutan. Jelas bahwa proses pemulihan alamiah ini juga turut ditentukan oleh kondisi lingkungan berbatasan. Jika lingkungan sekitar mengsuplai energi termal secara berlebihan, maka akan terjadi degradasi atau kerusakan ekosistem seperti (Gambar-3.6, bagian d). Fenomena seperti ini dapat kita amati pada hutan yang berbatasan dengan sumber-sumber panas seperti yang terjadi di sekitar gunung berapi.

Gambar-3.6., bagian (d) memperlihatkan kondisi ekosistem yang menerima pasokan energi cahaya dan/ atau energi termal secara berlebihan dalam waktu panjang. Pasokan energi yang berlebihan dapat menyebabkan gangguan fungsi-fungsi ekologis komponen ekosistem (misalnya mikroorganisme yang berperan dalam pelapukan bahan organik), sehingga terjadi degradasi alamiah ekosistem. Peningkatan radiasi cahaya yang menyebabkan peningkatan energi termal akan terdektesi melalui perubahan temporal dan spasial variabel iklim mikro serta perubahan parameter seperti gradien dan kedalaman efek tepi. Jika energi termal dalam hutan semakin meningkat maka akan terjadi penurunan gradien (di tepi hutan) variabel iklim mikro, dan peningkatan kedalaman efek tepi. Fluktuasi harian variabel iklim mikro dalam hutan meningkat mendekati fluktuasi di luar hutan.

Penelitian untuk menghasilkan data acuan pemantauan iklim mikro hutan, sangat penting dalam mengevaluasi kapasitas ekosistem menerima pasokan energi cahaya dan energi termal pada saat terjadi pemanasan global. Krauss *et al.* (2008) mengemukakan bahwa penelitian suhu ekstrim dan penentuan ambang batas suhu ekstrim, penting untuk evaluasi kondisi ekosistem hutan mangrove. Menurut Walther *et al.* (2002), Parmesan and Yohe (2003), Root *et al.* (2003), pergeseran iklim global akan diikuti oleh perubahan struktur dan fungsi ekosistem di seluruh dunia. Pengaruh perubahan iklim global akibat peningkatan radiasi cahaya dan emisi termal, secara langsung mempengaruhi iklim mikro ekosistem hutan. Iklim mikro menjadi indikator dini untuk memantau perubahan struktur dan fungsi ekosistem hutan dan interaksi antara ekosistem hutan dengan lingkungan berbatasan.

3.3.2. Pengaruh peningkatan energi cahaya dan energi termal terhadap kondisi ekosistem

Ekosistem hutan dan hutan mangrove bertumbuh pada rentang energi cahaya dan energi termal tertentu, demikian halnya kehidupan organisme dalam hutan

dan hutan mangrove. Hutan mangrove membutuhkan energi termal udara dan air/tanah dalam rentang harga tertentu yang terukur pada besaran iklim mikro seperti suhu udara, suhu air/lumpur dll. Rata-rata suhu udara untuk pertumbuhan hutan mangrove adalah 20°C , dengan rentang perubahan musiman kurang dari 5°C (Tomlison, 1986). Novelli *et al.*, 1990; Kao *et al.*, 2004; Stevens *et al.*, 2006; Stuart *et al.*, 2007 (dalam Krauss *et al.*, 2008) mengemukakan bahwa hutan mangrove tumbuh dipantai dengan suhu udara tidak kurang dari 20.8°C .

Peneliti-peneliti terdahulu mengungkapkan pengaruh perubahan iklim mikro terhadap proses ekologis dalam hutan, yang sebenarnya tidak lain adalah pengaruh kecukupan atau kelebihan energi cahaya dan energi termal dalam ekosistem dan lingkungan berbatasan. Peningkatan radiasi masuk yang berdampak pada peningkatan emisi termal dan difusi termal antar komponen ekosistem hutan, berpotensi menyebabkan gangguan alamiah pada vegetasi dan organisme dalam hutan (Meyer *et al.*, 2001). Perubahan energi cahaya dan energi termal dalam ekosistem mengendalikan proses ekologis, dan perubahan ini berasosiasi dengan perubahan variabel iklim mikro. Disini variabel iklim mikro dan parameter kuantitatif iklim mikro merupakan indikator perubahan energi cahaya dan energi termal dalam ekosistem dan lingkungan.

Beberapa peneliti berpendapat bahwa perubahan variabel iklim mikro seperti suhu udara mengendalikan proses ekologis dan merefleksikan secara dini perubahan fungsi ekosistem dan struktur bentang alam yang tidak kelihatan (Chen *et al.*, 1999; Davies Colley *et al.*, 2000; Gray *et al.*, 2002; Laurence, 2008). Meyer *et al.* (2001), mengemukakan bahwa perubahan iklim mikro memberi dampak pada proses ekologis kunci. Meyer *et al.* (2001) memberikan contoh: suhu ekstrim dapat terjadi pada batas dua tambalan dibandingkan pada bagian dalam tambalan karena massa udara pada batas tambalan lebih stabil. Suhu udara dan suhu tanah yang tinggi di lahan terbuka menghambat penyebaran insekta. Kelembaban yang rendah dekat tepi akan berpengaruh pada kehidupan biota tertentu. Chen *et al.*, (1999), mengutip Waring and Running (1998), mengemukakan bahwa proses-proses ekologis major seperti produksi, mineralisasi, penyebaran penyakit dan kerusakan-kerusakan alamiah dikontrol atau berkaitan langsung dengan kondisi iklim mikro. Kimberley *et al.*, (1997) mengemukakan bahwa: iklim mikro memiliki peran kritis terhadap regenerasi, pertumbuhan dan distribusi pohon. Kondisi iklim mikro menciptakan fitur-fitur fisis dan/atau mencegah penguapan air dari daun dan mengendalikan udara di bawah kanopi, sebagai tipikal hutan yang rapat. Menurut Edmond and Bigger (1984) yang dikutip Chen *et al.* (1993), banyak fitur biologi sekitar tepi hutan bergantung pada kondisi iklim mikro yang unik ini. Laju dekomposisi material di sekitar tepi dipengaruhi oleh fluktuasi kelembaban dan suhu tanah yang mempercepat aktivitas fungi dan organisme decomposer lainnya.

Intensitas radiasi matahari, suhu udara dan kelembaban udara mempengaruhi pertumbuhan pohon dengan mempengaruhi proses-proses fisiologis seperti fotosintesa, respirasi, perkecambahan benih, mortalitas dan aktivitas enzim.

Proses-proses ekosistem seperti dekomposisi, siklus nutrisi, suksesi dan produktivitas, secara parsial bergantung pada variabel-variabel iklim mikro. Brosofske *et al.* (1997) mengutip Johnson (1969), mengemukakan bahwa banyak hewan juga beradaptasi terhadap kondisi-kondisi iklim mikro yang spesifik. Kecepatan angin, suhu udara, kelembaban udara, dan radiasi matahari dapat mempengaruhi migrasi dan penyebaran insekta (*flying insects*). Tutupan kanopi yang rapat, dapat menjamin kelembaban udara yang tinggi di bawah kanopi yang menunjang pertumbuhan vegetasi.

Menurut Wolanski (2008) dan Kjerfve (1990) ekosistem mangrove dipengaruhi oleh elemen-elemen atmosferik seperti radiasi matahari, angin, hujan, evaporasi, evapotranspirasi, suhu udara, dan kelembaban udara. Evaporasi dan evapotranspirasi dalam hutan mangrove dihasilkan dari gabungan efek penyinaran matahari, suhu udara, kelembaban dan angin (Medeiros and Kjerfve, 1993; Hollins and Ridd, 1997). Yoko-o and Tokeshi (2011) dan Campbell (1998). mengemukakan bahwa angin sangat besar pengaruhnya pada pohon yang bertumbuh pada batas laut dengan daratan dibanding pohon yang berada di daratan. Pohon pantai yang terletak di bagian depan menghadap laut lebih pendek dibanding yang terletak di belakang karena pengaruh angin (Miura *et al.* 2001; Peterson 2004; Van Bloem and Murphy 2005; Yoko-o and Tokeshi, 2011). Pengaruh peningkatan penetrasi cahaya yang menyebabkan peningkatan energi termal sangat kuat mempengaruhi struktur dan fungsi hutan mangrove (Smith *et al.* 1994; Doyle *et al.*, 1995; Fromard *et al.*, 1998; Twilley *et al.*, 1999; Lugo, 2000; Baldwin *et al.*, 2001; Duke, 2001 Berger *et al.*, 2008).

3.3.3. Hubungan perubahan iklim mikro dengan perubahan struktur ekosistem hutan

Hubungan yang sangat signifikan antara perubahan iklim mikro dengan perubahan struktur hutan membuktikan hubungan perubahan struktur hutan dengan intensitas penyinaran matahari. Zheng *et al* (2000) mengutip Gray & Spies 1992, Heilman *et al.* 1996 mengemukakan bahwa perubahan iklim mikro karena pembabatan hutan menyebabkan perubahan signifikan proses fisis ekosistem, teristimewah mempengaruhi regenerasi tumbuhan dan komposisi species pada awal suksesi. Kita dapat menyimpulkan bahwa perubahan kondisi ekosistem seperti perubahan struktur kanopi dan perubahan lingkungan menyebabkan perubahan energi termal dan difusi termal yang selanjutnya menyebabkan perubahan iklim mikro. Sebaliknya perubahan energi termal dan difusi termal yang teridentifikasi melalui perubahan iklim mikro seperti kenaikan suhu udara dan penurunan kelembaban udara, akan menurunkan produksi bahan organik. Bahan organik ini dibutuhkan untuk menyuburkan tanah, menjamin pembenihan dan pertumbuhan pohon muda dst. Davies-Colley *et al.* (2000) mengemukakan bahwa kondisi iklim mikro sangat kuat

mempengaruhi proses-proses ekosistem, dan perubahan besaran iklim mikro di sekitar tepi hutan, secara dramatis diikuti perubahan struktur dan fungsi ekosistem (Murcia, 1995; Matlack and Litvaitis, 1999). Pada dasarnya perubahan iklim mikro diakibatkan oleh perubahan energi termal dan difusi termal antara hutan dengan lingkungan dan antar komponen ekosistem hutan. Perubahan ini akan terjadi lebih awal sebelum terjadi perubahan signifikan struktur dan fungsi ekosistem hutan.

3.3.4. Iklim mikro sebagai indikator dini perubahan ekosistem dan lingkungan

Tutupan kanopi hutan mempengaruhi penetrasi cahaya matahari dan akhirnya mempengaruhi emisi termal dan akumulasi energi termal di bawah kanopi. Perbedaan energi termal antara hutan dengan lingkungan menyebabkan difusi termal yang terukur melalui parameter-parameter kuantitatif iklim mikro. Perbedaan energi termal antara hutan dengan lingkungan berbatasan misalnya lahan terbuka ditunjukkan oleh perbedaan signifikan iklim mikro dan perubahan hariannya (Williams-Linera, 1990; Young and Mitchell, 1994; Chen *et al.*, 1995; Malanson and Carins, 1995; Cadenasso *et al.*, 1997; Brosofske *et al.*, 1997; Potter *et al.*, 2001; Spittlehouse *et al.*, 2004;). Perubahan struktur hutan akibat perombakan oleh manusia maupun karena faktor alam terdeteksi melalui perubahan temporal dan spasial iklim mikro (Brosofske *et al.*, 1997; Nelson *et al.*, 2007)

Perbedaanutupan kanopi, dapat menyebabkan perbedaan fluktuasi harian dan variasi spasial iklim mikro serta besaran-besaran parameter iklim mikro. Pola harian radiasi matahari dan suhu udara dapat menunjukkan perbedaan signifikan antara tiga kondisiutupan pohon/kanopi yakni, ditebang habis, ditebang sebagian dan pada tambalan (Chen and Franklin, 1997; Chen *et al.*, 1999;). Kanopi hutan cenderung mereduksi suhu udara harian dalam hutan dibandingkan dengan lahan terbuka luas (Young and Mitchell 1994; Chen *et al.* 1995; Spittlehouse *et al.*, 2004;). Kanopi hutan berperan mereduksi penetrasi cahaya ke bawah kanopi sehingga dapat mengendalikan peningkatan energi termal dan fluks termal yang teridentifikasi melalui suhu udara. Laurance (2000), Newmark (2001), dan Tamatamah (2007), mengemukakan bahwa perombakan hutan memberi dampak negatif terhadap keaneka-ragaman hayati karena mengubah ukuran, struktur dan komposisi hutan, dan hal ini diikuti oleh perubahan iklim mikro akibat terciptanya tepi. Perombakan hutan mengubah struktur hutan, membentuk tambalan, yang cenderung meningkatkan penerimaan radiasi, suhu udara (Moore *et al.*, 2005; Wayman and North, 2007, Ma *et al.*, 2010) dan kecepatan angin (Chen *et al.*, 1999; Davies Colley *et al.*, 2000;

deSiqueiran *et al.*, 2004). Drever and Lertzman (2003) mengemukakan bahwa praktek pemanfaatan hutan yang menyebabkan terbukanya kanopi seperti perampangan hutan dapat meningkatkan penyinaran dibanding sebelum terjadi perampangan hutan. Akibat perubahan tingkat penyinaran, maka terjadi perubahan keseimbangan energi radiasi matahari dalam ekosistem (Aussenac, 2000). Asbjornsen *et al.* (2004), De Siqueiran *et al.* (2004) dan Fletcher (2005), mengemukakan bahwa perbedaan struktur tambalan hutan dalam bentang lahan terfragmentasi (*fragmented landscape*) mempengaruhi pola iklim mikro sepanjang transek memotong tepi. Studi-studi empiris dalam tambalan dan lintas batas tambalan menunjukkan bahwa struktur bentang alam dapat ditentukan dan didelineasi menggunakan informasi iklim mikro. Tambalan dalam hutan akan menciptakan area tepi hutan yang fluktuasi iklim mikronya lebih tinggi dibanding bagian tengah hutan (Ma *et al.*, 2010). Menurut Chen *et al* (1993), dan Malanson and Carins (1995), perubahan yang terjadi pada bagian tepi hutan secara signifikan mempengaruhi aliran dan pertukaran energi, material dan species sepanjang tepi hutan yang mengalami perubahan. Menurut Chen *et al* (1995), banyak fitur-fitur ekologis dekat tepi, seperti stok dan regenerasi pohon, dan dekomposisi kayu, berhubungan dengan iklim mikro. Fluktuasi harian variabel-variabel iklim mikro seperti suhu tanah, suhu udara lebih besar pada lahan terbuka dibanding tertutup hutan (Matlack and Litvaitis, 1999; Davies-Colley *et al.*, 2000; Zheng *et al.*, 2000). Fluktuasi variabel iklim mikro ini disebabkan oleh fluktuasi energi termal sepanjang hari yang lebih besar ditempat terbuka. Fluktuasi energi termal disebabkan oleh penetrasi cahaya yang lebih besar di tempat terbuka. Fluktuasi variabel iklim mikro dalam hutan lebih rendah karena fluktuasi energi termal yang rendah di bawah kanopi. Hutan dapat mereduksi kecepatan angin menjadi 20 % dari kecepatan angin di tempat terbuka (Chen *et al.*, 1993; Davies Colley *et al*, 2000). Penelitian yang dilakukan oleh Chen and Franklin (1997), Xu *et al.* (1997), Davies-Colley *et al.* (2000), Saunders *et al.* (2003), Rambo and North (2008), Ma *et al* (2010), membuktikan bahwa variabel dan parameter iklim mikro peka dan dapat menunjukkan respons ekosistem hutan terhadap perubahan cuaca. Penelitian Hennenberg *et al.* (2008), menyimpulkan bahwa variabel iklim mikro (suhu udara, kelembaban udara, dan deficit tekanan uap air) menunjukkan perubahan harian yang berbeda pada musim kering dan musim hujan. Perubahan tutupan kanopi akibat pertumbuhan vegetasi akan terlihat pada perubahan gradien iklim mikro sepanjang transek memotong tepi tambalan (Chen *et al.*, 1999; Lieffers *et al.*, 1999). Semakin rapat tutupan kanopi, gradien iklim mikro di tepi hutan akan semakin terjal, karena penetrasi radiasi cahaya

arah horizontal dari tepi ke dalam hutan semakin berkurang. Variabel iklim mikro juga menunjukkan perbedaan antara pohon yang sudah dewasa dengan yang belum dewasa (Kapos, 1989; Williams-Linera, 1990; Carmago and Kapos, 1995; Chen *et al.*, 1995). Perbedaan ini berkaitan dengan perubahan tutupan kanopi dan pengaruhnya terhadap penetrasi radiasi cahaya pada arah vertical. Godefroid *et al* (2006) mengemukakan bahwa kedalaman penetrasi cahaya pada lahan terbuka bergantung pada tinggi pohon di sekitarnya dan jarak yang terpengaruhi bayangan.

Penelitian-penelitian ini membuktikan bahwa perubahan dalam ekosistem maupun lingkungan akan langsung berdampak dan terukur pada perubahan variabel-variabel iklim mikro. Ini berarti bahwa variabel-variabel iklim mikro dapat digunakan sebagai indikator untuk memantau perubahan kondisi ekosistem dan lingkungan. Perubahan kondisi termal seperti munculnya polutan di lingkungan sekitar batas hutan akan mengubah besaran variabel iklim mikro seperti gradien suhu udara, gradien kelembaban udara relatif, gradien kuat penerangan atau intensitas radiasi. Munculnya sumber energi termal di lingkungan sekitar akan terdeteksi lebih dini melalui perubahan iklim mikro, sebelum terjadi kerusakan hutan atau perubahan struktur hutan. Misalnya, gradien iklim mikro di batas hutan akan menjadi lebih terjal jika muncul sumber termal atau peningkatan pemanasan di lingkungan berbatasan

Perubahan temporal (harian), variasi spasial dan perubahan besaran parameter kuantitatif iklim mikro, juga dapat menjadi indikator untuk membedakan kondisi lingkungan. Misalnya, gradien suhu udara akan terjal pada batas hutan dengan lingkungan pemukiman yang padat. Kebanyakan hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu udara dalam hutan lebih rendah pada siang hari dan lebih tinggi pada malam hari dibanding di tempat terbuka dan tepi hutan (Chen *et al.*, 1995; Davies-Colley *et al.*, 2000; Spittlehouse *et al.*, 2004), sedangkan suhu udara di lingkungan pemukiman yang padat lebih tinggi dibanding suhu udara dalam hutan, waktu siang maupun malam hari (Kompeneers, 1978, dalam Godefroid and Koedam, 2003). Hal ini menunjukkan bahwa perubahan iklim mikro dan besaran parameter iklim mikro bergantung pada energi termal dan difusi termal antara ekosistem hutan dengan lingkungan. Dampak perombakan hutan mangrove di daratan terhadap perubahan iklim mikro sama dengan yang terjadi pada hutan di daratan. Menurut Hernandez (2011), pembabatan pohon mangrove menyebabkan kenaikan suhu tanah sebesar 13^oC, suhu udara 11^oC, sedangkan salinitas meningkat hingga 52 psu pada musim kering. Pembabatan hutan mangrove juga mengubah warna tanah dan kandungan pasir bertambah dari 42 menjadi 63.4%.

Hasil-hasil penelitian di atas membuktikan bahwa iklim mikro akan langsung berubah jika terjadi perubahan dalam ekosistem hutan seperti perubahan tutupan kanopi akibat penebangan pohon. Variabel-variabel iklim mikro juga langsung berubah jika terjadi perubahan energi termal di lingkungan sekitar hutan (Moore *et al.*, 2005; Godefroid *et al.*, 2006; Berger *et al.*, 2008), sebelum dampaknya pada gangguan fungsi ekosistem terdeteksi. Kepekaan variabel-variabel iklim mikro terhadap perubahan ekosistem dan dampak perubahan lingkungan terhadap ekosistem hutan (Chen *et al.*, 1999; Zheng *et al.*, 2000), menunjukkan pentingnya karakterisasi iklim mikro ekosistem hutan. Karakterisasi iklim mikro hutan akan menghasilkan data acuan untuk pemantauan perubahan iklim mikro hutan, akibat terjadinya perubahan dalam ekosistem hutan maupun lingkungan. Menurut Brosofske *et al.* (1997) iklim mikro menjadi pertimbangan penting dalam manajemen ekosistem karena pengaruhnya pada proses dan fungsi ekosistem. Chen *et al.* (1999), mengemukakan bahwa informasi iklim mikro sangat penting untuk studi lapangan, pemodelan teoritik, dan pengambilan kebijakan manajemen sumberdaya. Brosofske *et al.* (1997), Zheng *et al.* (2000) dan Iverson and Hutchinson (2002) melakukan penelitian (karakterisasi) iklim mikro hutan sebagai acuan dalam management hutan.

3.3.5. Pengaruh Iklim Mikro terhadap Keberadaan Species Biota

Studi tentang hubungan iklim mikro dengan keberadaan species dalam ekosistem hutan telah menarik perhatian para pakar sejak berabad-abad lalu. Berbagai parameter kuantitatif yang menghubungkan rentang dan perubahan variabel iklim mikro dengan keberadaan dan pergerakan species dalam ekosistem telah dikembangkan melalui penelitian. Secara konseptual, hubungan antara perubahan variabel iklim mikro dengan keberadaan dan pergerakan biota dalam ekosistem ditunjukkan oleh proses difusi termal dan difusi species biota. Proses difusi termal dan difusi species biota sepanjang hari, secara empirik terukur dalam besaran kuantitatif seperti fluktuasi gradien di tepi dan kedalaman efek tepi. Perubahan harian kedua parameter, signifikan terjadi pada wilayah tepi hutan atau habitat tepi. Kedua parameter ini menjadi kajian menarik di bidang fisika lingkungan dan ekologi, karena parameter ini menggambarkan respons ekosistem terhadap penyinaran dan interaksi ekosistem hutan dengan lingkungan.

Beberapa peneliti terdahulu telah mendeskripsikan keterkaitan antara perubahan dan kondisi ekosistem dengan iklim mikro dan keberadaan serta pergerakan species di sekitar batas fragmen hutan atau tambalan. Kerapatan hewan di sekitar tepi atau batas habitat sangat signifikan dipengaruhi oleh iklim mikro

(Haynes and Cronin, 2006). Chen *et al* (1999) mengemukakan bahwa perbedaan iklim mikro antara hutan yang dirombak dengan yang alamiah, atau antara area hutan sebelum dan sesudah dirombak menjadi kajian menarik karena iklim mikro secara langsung berkaitan dengan distribusi species dalam tambalan dan pergerakan species antar tambalan. Menurut mereka, hal ini menjadi alasan pentingnya studi iklim mikro terkait dengan keberadaan dan migrasi species biota dalam ekosistem dan lingkungan. Secara kuantitatif hal ini dibuktikan oleh kesesuaian antara proses difusi energi termal dengan difusi species.

Difusi termal pada batas hutan dengan tempat terbuka atau pada batas matriks (beberapa tambalan berbatasan) menentukan difusi species antar tambalan atau pada habitat tepi sekitar batas hutan dengan tempat terbuka. Pengaruh perubahan energi cahaya dan energi termal yang terukur melalui iklim mikro terhadap keberadaan, sebaran dan konsentrasi species biota antara lain dikemukakan dalam beberapa hasil penelitian berikut ini. Hawley (2010) meneliti pengaruh perubahan penetrasi radiasi matahari ke bawah kanopi terhadap keberadaan dan sebaran biota di bawah kanopi. Raghu *et al* (2004) mengemukakan bahwa iklim mikro dan arsitektur tumbuhan berpengaruh signifikan terhadap kehidupan biota. Chen *et al.* (1999), Godefroid *et al.* (2007), Rambo and North (2008), Chantanaorrapint (2010), mengemukakan bahwa keberadaan, sebaran dan pergerakan species biota tertentu dalam hutan dipengaruhi oleh suhu udara dan perubahannya sepanjang hari. Brososke *et al.* (1997), Chen *et al.* (1999), Godefroid *et al.* (2007), Rambo and North (2008), menyimpulkan bahwa kelembaban udara dan perubahan kelembaban sepanjang hari mempengaruhi keberadaan dan pergerakan biota dalam ekosistem hutan. Kelembaban ideal dibutuhkan untuk pertumbuhan vegetasi dan tentunya akan berpengaruh pada kehidupan species biota tertentu.

Aktivitas mikroba dipengaruhi oleh suhu dan kelembaban tanah (Fisher and Binkley 2000). Chen *et al.* (1999), Godefroid *et al.* (2007), mengemukakan bahwa iklim mikro tanah mempengaruhi aktivitas species biota tertentu yang hidup di dalam hutan. Zheng *et al* (2000), mengutip Xu *et al* (1997) mengemukakan bahwa variasi spasial suhu udara dan suhu tanah berbanding terbalik dengan keragaman species organisme dalam tumbuhan (*ground flora*). Menurut Cotton 2003, Murphy-Klassen *et al.* 2005 dalam Studds and Marra (2007), perubahan suhu (udara dan tanah) dapat menyebabkan perubahan pada siklus pembiakan biota tertentu.

Beberapa studi membuktikan bahwa habitat tepi merupakan area dengan keragaman species biota yang tinggi. Perbedaan kondisi abiotik yang tinggi di sekitar tepi menjadikan habitat tepi didiami lebih banyak species biota (Cronin and Haynes 2004). Habitat tepi, dicirikan oleh iklim mikro yang dinamis, menentukan penyebaran species tumbuhan serta species hewan, insekta, burung dll. Brososke *et al.* (1997) dalam penelitian pada area riparian menyimpulkan bahwa kebanyakan ikan membutuhkan rentang termal tertentu dimana mereka dapat bertahan; hal ini berarti perubahan variabel iklim mikro seperti intensitas

penyinaran yang mempengaruhi suhu air akan menyebabkan perubahan kesesuaian habitat untuk beberapa jenis biota (Magnuson *et al.* 1979).

Perbedaan habitat tepi memunculkan efek tepi antar tambalan; demikian halnya pada batas fragmen hutan dengan tempat terbuka. Menurut Laurence (2008), efek tepi mengubah dinamika hutan, dan menyebabkan pergeseran komposisi species, arsitektur hutan dan iklim mikro. Dinamika harian efek tepi iklim mikro sangat kuat pengaruhnya pada migrasi harian biota dalam ekosistem. Menurut Gehlhausen *et al.* (2000), kekayaan species berkaitan erat dengan variasi iklim mikro di sekitar tepi hutan, khususnya cahaya dan kelembaban tanah. Menurut Godefroid *et al.*, (2006), banyak species menunjukkan respons yang berbeda terhadap kombinasi faktor iklim mikro seperti suhu tanah dan peningkatan kelembaban udara.

Gradien iklim mikro di batas hutan dengan lingkungan sangat menentukan konsentrasi dan sebaran species biota tertentu (Godefroid and Koedam, 2003; Godefroid *et al.*, 2007; Gradstein, 2008). Gradien iklim mikro merupakan parameter yang dapat dijadikan indikator keberadaan, sebaran species biota tertentu di sekitar tepi hutan. Perubahan harian gradien iklim mikro menjadi indikator pergerakan species biota sekitar batas ekosistem hutan.

Perombakan area hutan menyebabkan perubahan iklim mikro yang berdampak pada keberadaan dan migrasi species biota tertentu dalam hutan. Keberadaan species biota dipengaruhi oleh perubahan intensitas cahaya atau kuat penerangan dan perubahan energi termal. Ada species biota yang dapat bertahan ketika terjadi peningkatan kuat penerangan dan kenaikan suhu, tapi ada juga species yang tidak toleran terhadap penerangan sehingga berpindah ke tengah hutan yang lebih gelap dan dingin (Chen *et al.* 1999). Menurut Meerman (2000), banyak organisme hidup dalam habitat yang sempit sesuai kondisi iklim mikro. Habitat yang sempit tentunya mengalami fluktuasi energi termal dan iklim mikro yang lebih besar dibanding hutan yang luas dan rindang.

Karakteristik habitat tepi hutan berbeda dengan karakteristik habitat tepi hutan mangrove, namun memperlihatkan pola hubungan yang sama dalam hal perubahan iklim mikro dan keberadaan organisme. Luther and Greenberg (2009) mengemukakan bahwa dalam ekosistem mangrove terdapat 48 jenis burung, 14 reptil, 1 amfibi, dan 6 mamalia endemic Asia dan Australia. Keberadaan species biota ini ditentukan oleh iklim mikro. Wolanski (2008) mengemukakan bahwa biota dalam hutan mangrove sangat dipengaruhi faktor curah hujan, angin, kelembaban dan naungan terhadap cahaya matahari. Jeffrey and Sherry (1994), mengutip Wolda 1988 mengemukakan bahwa tutupan vegetasi, suhu udara dan kelembaban relatif sangat mempengaruhi distribusi, periode aktivitas dan kelimpahan insekta dalam hutan mangrove. Paula *et al.* (2003) mengemukakan bahwa larva *P. catenata* berkembang optimal di air laut yang agak asin dengan suhu sekitar 25 °C. Kjerfve and Macintosh (1997) mengemukakan bahwa distribusi ikan, moluska dan kerang (*crustaceans*) akan menyesuaikan secara cepat terhadap peningkatan suhu. Dalam hutan mangrove, hewan-hewan berbadan lunak sangat sensitive terhadap peningkatan suhu

sedangkan spesies-spesies ketang lebih dapat bertahan terhadap peningkatan suhu air.

Menurut Vannini *et al.*(1997), kepiting pohon (*Sesarma leptosoma Hilgendorf*) bermigrasi naik ke atas cabang mangrove dua kali sehari, meninggalkan tempat mencari makan di antara daun segar yang tersebar di perakaran mangrove. Migrasi naik terjadi pada pagi dan sore hari, dikontrol oleh faktor non-pasut. Migrasi naik pada pagi hari dikontrol oleh penyinaran matahari semata. Kepiting akan segera turun setelah suhu udara naik dan kelembaban mulai turun. Migrasi naik sore hari dikontrol oleh faktor cahaya dan pasut. Pada siang hari, kepiting pohon menjauh dari kanopi untuk menghindari kelembaban relatif yang rendah dan pengaruh angin yang dapat menyebabkan dehidrasi. Daren and Harris (2005), membuktikan pengaruh kondisi habitat terhadap keberadaan dan pergerakan semut Argentina (*Argentine ants*). Di hutan yang tutupan kanopinya rapat, semut Argentina bergerak hingga kedalaman 20 m dari tepi. Dalam hutan mangrove dan belukar yang lebih terbuka, semut Argentina bermigrasi hingga kedalaman 30 m dan 60 m.

Rajpar and Zakaria (2011) mengemukakan bahwa komposisi dan struktur vegetasi dan variabel-variabel iklim mikro seperti suhu udara, kelembaban relatif dan intensitas cahaya akan menentukan distribusi, keragaman dan kepadatan species burung dalam ekosistem perairan. Perubahan struktur hutan mangrove akibat penebangan atau perombakan area unrtuk tambak dll., secara langsung mengubah iklim mikro dan menyebabkan gangguan pada organisme. Hasil-hasil penelitian membuktikan bahwa gangguan struktur hutan mangrove akan diikuti proses-proses fisis yang akan membawa efek pada tumbuhan dan hewan (Gladstone and Schreider, 2003; Morrisey *et al.*, 2007). Perombakan mangrove sangat signifikan dampaknya pada komunitas vegetasi dan habitat fauna tertentu. Perombakan hutan mangrove akan meningkatkan penetrasi cahaya dan perubahan energi termal (dengan indikator perubahan suhu udara dll), yang signifikan mempengaruhi kehidupan biota dalam hutan mangrove (Berger *et al.*, 2008; Hawley, 2010) atau ekosistem perairan (Rutherford *et al.*, 1997).

Perubahan struktur vegetasi dan fungsi ekologis hutan mangrove akibat pemanasan global diperkirakan sangat mempengaruhi keberadaan dan migrasi species biota tertentu yang hidup dalam hutan mangrove. Indikasinya adalah dampak perubahan pertumbuhan mangrove dan keberadaan organisme dan mikroorganisme pada saat terjadi musim kering yang panjang (Mazda and Kamiyama, 2007). Pada saat terjadi pemanasan global, Kjerfve and Macintosh (1997) memprediksi distribusi ikan, moluska dan kerang akan cepat menyesuaikan diri terhadap peningkatan suhu sedangkan hewan-hewan yang berbadan lunak yang sangat peka terhadap peningkatan suhu kemungkinan akan bermigrasi lebih jauh ke dalam hutan atau akan hilang sama sekali. Species-species kepiting (*crab*) diperkirakan lebih dapat bertahan terhadap peningkatan suhu akibat pemanasan global

3.4. Variabel-variabel Iklim Mikro untuk Karakterisasi Ekosistem Hutan

3.4.1. Hasil penelitian karakterisasi iklim mikro hutan

Para ahli meneliti iklim mikro hutan berdasarkan pengukuran beberapa variabel iklim mikro. Variabel iklim mikro yang dipilih untuk diteliti bergantung tujuan dan penekanan materi penelitian. Menurut Davies-Colley *et al.* (2000), paling tidak ada lima variabel yang secara bersama-sama mengkarakterisasi iklim mikro yakni: penetrasi cahaya matahari, penetrasi angin, presipitasi (curah hujan), suhu (tanah dan udara), kelembaban (tanah dan udara). Newmark (2001), Godefroid *et al.* (2006), Hennenberg *et al.* (2008), mengemukakan bahwa parameter iklim mikro yang banyak diteliti untuk mengkarakterisasi hutan adalah suhu udara, kelembaban udara (atau defisit tekanan uap) dan intensitas radiasi. Chen *et al.* (1995) melakukan penelitian untuk mengkarakterisasi iklim mikro hutan menggunakan variabel suhu udara, suhu tanah, kelembaban relatif, radiasi cahaya, dan kecepatan angin. Untuk meneliti perubahan harian dan musiman gradien iklim mikro pada arah vertical dan horizontal, Rambo and North (2008) mengukur dan menganalisis perubahan variabel suhu udara dan kelembaban udara. Heithecker and Halpern (2007) mengkarakterisasi iklim mikro area sekitar tepi hutan dengan meneliti gradien kuat penerangan, suhu udara, suhu tanah dan kelembaban tanah.

Angin merupakan variabel iklim mikro, yang turut mempengaruhi variabel iklim mikro lainnya seperti suhu udara dan kelembaban udara. Faktor angin berpengaruh signifikan terhadap aliran fluks termal dalam ekosistem atau antara lingkungan dengan ekosistem hutan. Pengaruh angin terhadap aliran fluks termal, menyebabkan perubahan pola spasial variabel iklim mikro. Proses difusi termal di bawah pengaruh angin dikenal sebagai difusi tertekan (*forced diffusion*), sedangkan pada kondisi tidak ada pengaruh angin, difusi termal berlangsung dalam keadaan tunak (*steady state*) atau difusi tak tertekan (*unforced diffusion*).

Angin yang bertiup dari arah luar ke tengah hutan akan menyebabkan peningkatan kedalaman efek tepi variabel iklim mikro lainnya seperti suhu udara, kelembaban udara, dan suhu tanah. Sebaliknya, jika angin bertiup dari dalam hutan ke arah luar maka kedalaman efek tepi variabel iklim mikro cenderung berkurang (Chen *et al.*, 1995; Davies-Colley *et al.*, 2000). Angin juga dapat mengubah gradien variabel iklim mikro di tepi hutan. Angin yang bertiup dari luar ke dalam hutan, menyebabkan kemiringan gradien berkurang, sebaliknya jika angin bertiup dari dalam hutan ke arah luar, gradien variabel iklim mikro akan bertambah terjal (Chen *et al.*, 1995; Davies-Colley *et al.*, 2000).

Karakterisasi iklim mikro hutan mangrove sangat signifikan dipengaruhi oleh dampak penyinaran matahari pada permukaan air terbuka dan permukaan air di bawah kanopi. Menurut Malanson and Carins (1995), faktor yang sangat penting dalam menganalisis perubahan iklim mikro sekitar batas habitat adalah peningkatan radiasi cahaya yang diterima sepanjang tepi hutan. Pentingnya penetrasi radiasi matahari dalam mengendalikan iklim mikro ekosistem

mangrove, dikemukakan oleh Mazda and Wolanski (2009). Menurut Mazda and Wolanski, variasi harian radiasi matahari menyebabkan perubahan suhu udara dan suhu tanah, khususnya pada dataran pasut yang berbatasan dengan hutan mangrove. Variasi ini menghasilkan perubahan harian suhu udara dan suhu air yang menggenangi rawah mangrove. Miura *et al.* (2001), Peterson (2004); Van Bloem and Murphy (2005), Yoko-o and Tokeshi (2011), menekankan pentingnya faktor angin dalam menganalisis iklim mikro ekosistem hutan mangrove. Angin dapat mempengaruhi pola perubahan harian suhu udara dan kelembaban udara, suhu air dan dalam jangka panjang mempengaruhi struktur hutan mangrove yang berhadapan langsung dengan laut terbuka.

Penetrasi cahaya yang menyebabkan perubahan energi termal dan difusi termal antar komponen ekosistem, menjadi pertimbangan untuk penetapan variabel yang diteliti. Analisis komprehensif untuk karakterisasi iklim mikro hutan harus melibatkan indikator-indikator yang berkaitan langsung dengan perubahan energi cahaya dan energi termal pada komponen-komponen ekosistem, sebagaimana dikemukakan Davies-Colley *et al* (2000), Moore *et al.* (2005), dll.

3.4.2. Interaksi antar variabel iklim mikro Variabel-variabel iklim mikro yang mengkarakterisasi ekosistem hutan (dan ekosistem lainnya) berkaitan satu sama lain. Perubahan harian variabel iklim mikro diawali oleh perubahan energi cahaya yang masuk ke bawah kanopi, mengikuti elevasi matahari. Energi cahaya dalam ekosistem hutan dihasilkan dari penetrasi langsung (melalui celah kanopi), difusi cahaya arah vertical dan horizontal (Malanson and Carins 1995; Moore *et al.*, 2005). Energi cahaya menghasilkan energi termal melalui proses absorpsi dan emisi oleh komponen ekosistem serta difusi antar komponen ekosistem dan antara ekosistem hutan dengan lingkungan berbatasan. Hal ini terbukti dari pengaruh variabel intensitas radiasi atau kuat penerangan terhadap variabel iklim mikro lainnya (suhu udara, kelembaban udara, suhu tanah, kelembaban tanah). Wales (1967) dan Raney (1977) yang dikutip Chen *et al.* (1993) mengemukakan bahwa iklim mikro sangat dipengaruhi orientasi tepi hutan terhadap lintasan matahari. Hasil penelitian Wales and Raney ini membuktikan bahwa penurunan variabel iklim mikro dari tepi ke bagian dalam hutan mengikuti penurunan radiasi matahari. Mereka juga mengemukakan bahwa radiasi matahari adalah satu satunya sumber energi yang perubahannya diikuti perubahan variabel iklim mikro seperti suhu udara, suhu tanah, kelembaban relatif. Chen *et al.* (1995) mengemukakan bahwa variabel suhu udara, kelembaban udara dan suhu tanah, berubah sepanjang waktu mengikuti penyinaran matahari.

Perubahan spasial variabel iklim mikro habitat tepi dan pola distribusi biota di dalamnya (Chen *et al.*, 1993; Malanson and Carins, 1995; Gehlhausen *et al.*, 2000; Gradstein, 2008) membuktikan bahwa penyinaran matahari merupakan faktor pengendali iklim mikro (Matlack, 1993; Moore *et al.*, 2005; Hawley, 2010). Pada siang hari, besaran variabel suhu udara dan suhu tanah lebih tinggi di tempat terbuka kemudian menurun dengan bertambahnya jarak dari tepi ke dalam hutan (Chen *et al.*, 1995; Gehlhausen *et al.*, 2000; Newmark, 2001;

Godefroid *et al.*, 2006), mengikuti perubahan spasial energi cahaya dari tepi ke dalam hutan. Sebaliknya, besaran kelembaban udara dan kelembaban tanah bertambah dari tepi ke arah dalam hutan (Breshears *et al.*, 2009; Duniway *et al.*, 2010) dikarenakan berkurangnya energi termal, sebagai akibat berkurangnya energi cahaya matahari. Perubahan variabel iklim mikro diikuti oleh perubahan-perubahan variabel fisis lainnya seperti evaporasi dan evapotranspirasi. Medeiros and Kjerfve (1993) dan Hollins and Ridd (1997) mengemukakan bahwa evaporasi dan evapotranspirasi dalam hutan mangrove dihasilkan dari gabungan efek penyinaran matahari, suhu udara, kelembaban udara dan angin

Tugas pengembangan (kelompok)

1. Gambarkan dalam skema dan deskripsikan proses perubahan iklim mikro harian, mencakup penyinaran matahari, absorbs termal, emisi termal, difusi termal, hingga terjadinya perubahan temporal dan apasial iklim mikro
2. Jelaskan bentuk dasar variasi temporal iklim mikro dan mengapa polanya seperti itu. Rumuskan bentuk umum fungsi matematisnya
3. Jelaskan bentuk dasar variasi spasial iklim mikro, dan berikan penjelasan mengapa bentuknya seperti itu. Rumuskan bentuk umum fungsi matematisnya
4. Jelaskan perbedaan hutan dan hutan mangrove (sesuai karakteristik komponen ekosistem) dalam menyerap energy radiasi matahari dan mengemisi termal. Manakah yang lebih stabil, antara iklim mikro dalam hutan dengan dalam hutan mangrove?
5. Jelaskan pengaruh angin terhadap variasi spasial suhu udara dan kelembaban udara, berdasarkan proses difusi termal udara

Tugas perorangan:

- Jelaskan bagaimana perubahan harian suhu dan kelembaban udara: (a) manakah yang tinggi antara siang dengan malam, (b) manakah yang tinggi antara tempat terbuka dengan di tengah hutan lebat
- Jika suhu udara dalam hutan lebih tinggi dari tempat terbuka, bagaimanakah perbedaan suhu antara batas hutan dengan tengah hutan?. Mengapa demikian?
- Jelaskan konduksi panas dari permukaan ke lapisan di bawah permukaan tanah, dan bandingkan difusi termal udara dari daerah terbuka ke tengah hutan?
- Beberapa peneliti menyatakan bahwa iklim mikro merupakan indicator yang peka terhadap perubahan ekosistem hutan. Jelaskan bagaimana memonitor perubahan hutan akibat penebangan di bagian dalam?

4. HABITAT TEPI DAN PARAMETER IKLIM MIKRO



4.1. Habitat Tepi

Dalam mengkarakterisasi iklim mikro hutan, para peneliti melakukan pengamatan atau pengukuran pada bagian tepi hingga kedalaman tertentu dalam hutan. Fokus perhatian peneliti pada area sekitar tepi hutan dikarenakan pada area inilah terjadi perubahan harian iklim mikro dan aktivitas biota yang signifikan. Habitat tepi sering juga disebut tepi hutan, adalah suatu area transisi dari keadaan luar ke keadaan dalam hutan. Menurut Godefroid and Koedam (2003), Spittlehouse *et al.* (2004), tepi hutan adalah zona transisi antar habitat berbeda yang juga dikenal sebagai ekoton. Kondisi habitat tepi merupakan transisi antara kondisi dalam hutan dengan kondisi ruang terbuka atau lingkungan berbatasan (Godefroid and Koedam, 2003; Ries *et al.* 2004; Spittlehouse *et al.*, 2004), yang diketahui menjadi habitat dari berbagai species biota (Gehlhausen *et al.*, 2000). Dalam buku ini digunakan istilah habitat tepi, untuk membedakan dengan istilah tepi hutan, yang secara fisis merupakan bidang batas (vertikal) antara hutan dengan lingkungan atau antar tambalan. Penggunaan istilah ini, juga disesuaikan dengan fokus pembahasan difusi termal, serta kaitannya dengan difusi species biota.

Menurut Malanson and Carins (1995), habitat tepi dapat didefinisikan berdasarkan batasan biotik (misalnya area predator) atau batasan abiotik (misalnya suhu). Secara fisis, habitat tepi adalah area dimana terjadi difusi energi (cahaya dan termal), yang terukur dalam penetrasi variabel iklim mikro dari tepi ke dalam hutan. Sama halnya dengan batasan fisis, habitat tepi secara biotik adalah area dimana berlangsung difusi species biota tertentu. Pengaruh difusi termal terukur menurut variabel iklim mikro dengan kedalaman berbeda satu sama lain. Demikian halnya, sebaran atau area predasi biota yang satu berbeda dengan biota lainnya. Kendati demikian telah banyak peneliti yang menghubungkan struktur tepi hutan dengan iklim mikro dan pergerakan species (Murcia, 1995; Matlack and Litvaitis, 1999; Zheng *et al.*, 2000; Kora *et al.*, 2005; Godefroid *et al.*, 2006).

Menurut Chen *et al.* (1993), Malanson and Carins (1995), perubahan yang terjadi pada bagian tepi hutan secara signifikan mempengaruhi aliran dan pertukaran energi, material dan species sepanjang tepi hutan yang mengalami perubahan. Sebagaimana telah dibahas dalam Bab 3, perubahan struktur hutan baik karena proses alam ataupun aktivitas manusia, akan menyebabkan perubahan iklim mikro dan berdampak pada perubahan vegetasi maupun biota yang ada di dalam hutan (Laurance, 2000; Newmark, 2001; Tamatamah, 2007). Fenomena aliran energi dan pergerakan species dalam habitat tepi menjadi perhatian banyak peneliti, dan akan semakin menantang ke depan terkait dampak pemanasan global.

Habitat tepi hutan sangat ditentukan oleh kondisi kanopi. Pengaruh kanopi menyebabkan intensitas radiasi cahaya berkurang dari tepi (yang berbatasan dengan bentang alam terbuka) ke dalam hutan. Semakin tebal kanopi, penetrasi dan difusi radiasi cahaya semakin rendah, dan penurunan energi cahaya dari tepi ke tengah hutan semakin besar. Perubahan spasial intensitas radiasi cahaya atau kuat penerangan berbentuk eksponensial, dimana penurunan kuat penerangan

terbesar di tepi dan semakin dalam ke hutan semakin kecil (Chen *et al.* (1993), Godefroid and Koedam (2003), Spittlehouse *et al.* 2004).

Pola perubahan spasial iklim mikro dalam habitat tepi juga ditentukan oleh kondisi lingkungan berbatasan. Perbedaan tingkat penetrasi cahaya, absorpsi dan

emisi termal oleh lingkungan, mempengaruhi difusi termal dari tepi ke dalam hutan atau sebaliknya. Pengaruh lingkungan terhadap perubahan iklim mikro dalam habitat tepi hutan antara lain dikemukakan dalam hasil penelitian berikut ini. Gehlhausen *et al.* (2000) mengemukakan bahwa tepi yang berbatasan dengan lahan pertanian mengalami perubahan iklim mikro yang lebih ekstrim dibanding yang berbatasan dengan pepohonan. Fluktuasi iklim mikro lebih besar di sekitar tepi hutan yang berbatasan dengan lahan terbuka, dibanding tepi hutan yang berbatasan dengan belukar (Hennenberg *et al.*, 2008). Fluktuasi iklim mikro dalam habitat tepi hutan primer juga berbeda dengan hutan muda (Murcia, 1995). Didham and Lawton (1999) mengemukakan bahwa penetrasi tepi untuk kebanyakan variabel iklim mikro dan struktur vegetasi pada tepi terbuka, dua hingga lima kali lebih besar dari penetrasi tepi pada tepi yang tertutup. Penetrasi radiasi cahaya lebih besar pada lahan terbuka, menyebabkan emisi termal yang lebih tinggi dan lebih berfluktuasi. Fluktuasi termal yang tinggi di lahan terbuka menyebabkan fluktuasi difusi termal yang lebih tinggi pada habitat tepi hutan berbatasan dengan lahan terbuka. Jika hutan berbatasan dengan area pemukiman padat atau ada aktivitas yang mengemisi termal, maka energi termal di luar akan lebih tinggi daripada dalam hutan, siang maupun malam hari (Kempeneers, 1978 dalam Godefroid and Koedam, 2003).

Ukuran (luas) area terbuka dan adanya tambalan menentukan luas atau ukuran habitat tepi. Hasil penelitian Spittlehouse *et al.* 2004 menunjukkan bahwa area terbuka berukuran lebih dari 1 ha menyebabkan penetrasi efek tepi suhu udara hingga jarak 25 m ke dalam hutan. Lingkungan terbuka berukuran besar menyebabkan penetrasi efek tepi suhu tanah dan kelembaban tanah mencapai jarak 25 m ke dalam hutan. Jika ukuran area terbuka kurang dari 1 ha fluktuasi suhu tanah dan kelembaban tanah hanya mencapai jarak sekitar 5 m dari tepi. Celah kanopi yang terjadi karena faktor alam atau aktivitas manusia pada habitat tepi menyebabkan perubahan iklim mikro dan mempengaruhi regenerasi dan diversitas habitat (Latief and Blackburn, 2010). Asbjornsen *et al.* (2004) dan Nascimento (2006) mengemukakan bahwa perbedaan struktur hutan antar tambalan mempengaruhi pola iklim mikro sepanjang transek memotong batas tambalan atau lingkungan. Pinto *et al.*, (2010) menyatakan bahwa iklim mikro hutan dipengaruhi oleh banyak sekali variabel terutama dengan adanya matriks (beberapa tambalan) dengan kondisi bervariasi seperti usia fragmen, jenis vegetasi, dan tinggi tegakan. Fletcher (2005) menyimpulkan bahwa efek tepi berganda (karena adanya tambalan) akan meningkatkan kekuatan dan pengaruh efek tepi ke bagian dalam hutan, yang berarti mengubah dimensi dan kondisi habitat tepi hutan.

Faktor-faktor yang mempengaruhi dimensi dan kondisi habitat tepi seperti tutupan kanopi hutan, ukuran dan kondisi lingkungan berbatasan dan adanya

tambalan, semuanya berkaitan dengan difusi energi cahaya dan energi termal dalam habitat tepi. Fluktuasi energi cahaya dan energi termal ini mempengaruhi sebaran dan pergerakan species biota dalam habitat tepi (Chen *et al.*, 1993; Malanson and Carins 1995). Habitat tepi dikenal terdiri dari lingkungan-mikro (*microenvironments*) yang menjadi habitat untuk species-species yang berbeda dengan yang ada dalam hutan (Gehlhausen *et al.*, 2000). Hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa fluktuasi konsentrasi species lebih tinggi di sekitar habitat tepi di banding di dalam hutan (Chen *et al.*, 1993; Malanson and Carins, 1995; Goldblum and Beatty, 1999)., mengikuti fluktuasi iklim mikro (Didham and Lawton, 1999; Laurence *et al.*, 2002; Haynes and Cronin, 2006). Hasil penelitian Godefroid and Koedam (2003) menunjukkan bahwa habitat tepi mengandung sejumlah species yang tidak toleran terhadap naungan (*shade-intolerant species*) dan juga tumbuhan pionir sedangkan pada bagian dalam hampir eksklusif ditempati species yang toleran terhadap naungan. Banyak studi terkait dengan masalah ini dan telah membuktikan bahwa habitat tepi secara tipikal memiliki komposisi species dan struktur komunitas yang berbeda dari dalam hutan (Fraver, 1994; Harper *et al.*, 2005;), karena perbedaan iklim mikro. Adanya beberapa tambalan berdekatan yang mempengaruhi difusi termal dari tepi ke dalam hutan, secara signifikan mempengaruhi interaksi organisme (Ramos and Santos, 2006).

Teori difusi energy cahaya dan energy termal, didukung hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa habitat tepi adalah area yang kaya akan keragaman species biota, karena adanya suplai energy harian oleh matahari. Perombakan habitat tepi akan memunculkan dampak berantai, mulai dari peningkatan fluktuasi iklim mikro, perubahan kondisi vegetasi dan pertumbuhan pohon (penyebaran dan pertumbuhan benih dll), pergeseran atau berkurang bahkan punahnya species biota tertentu. Keller (2005) mengemukakan: pembabatan hutan (terutama habitat tepi) menyebabkan perubahan jangka pendek dan jangka panjang iklim mikro hutan, erosi dan kompaksi tanah serta merusak siklus nutrisi. Menurut Asbjornsen *et al.* (2004), habitat tepi merupakan fitur dominan dan dapat secara langsung mempengaruhi kapasitas vegetasi memperbaiki kondisi iklim mikro dan mendukung keberhasilan regenerasi habitat yang telah rusak. Kebijakan pemanfaatan kawasan sekitar hutan hendaknya memperhatikan fungsi ekologis habitat tepi dan kondisi habitat tepi untuk menghindari dampak berantai yang merusak ekosistem hutan secara keseluruhan. Ketersediaan data iklim mikro sebagai indikator yang peka terhadap perubahan kondisi ekosistem dan pengaruh lingkungan, dibutuhkan sebagai acuan pemantauan dan evaluasi kondisi ekosistem. Data parameter kuantitatif iklim mikro akan menjadi acuan terukur dalam pemantauan dan evaluasi perubahan kondisi ekosistem hutan dan pengaruh lingkungan (Laurence *et al.*, 2002). Data kuantitatif iklim mikro yang terpadu dengan kondisi ekologis habitat tepi perlu tersedia sejak dini untuk pemantauan dan evaluasi dampak pemanasan global terhadap ekosistem hutan

4.2. Parameter Iklim Mikro untuk Karakterisasi Ekosistem Hutan

Pemantauan dan evaluasi kondisi ekosistem hutan membutuhkan data kuantitatif yang dapat menunjukkan perubahan temporal dan spasial. Parameter (kuantitatif) iklim mikro yang umum digunakan adalah: harga maksimum siang dan malam hari, beda terbesar kuantitas iklim mikro antara posisi di luar hutan, di tepi dan di dalam hutan, kedalaman efek tepi, gradien iklim mikro, dan *time-lag* antar variabel iklim mikro. Dalam bab ini, selain dibahas hasil penelitian beberapa parameter iklim mikro, juga diperkenalkan parameter iklim mikro yang baru yakni luas bidang dan koefisien dinamika harian gradien iklim mikro di tepi. Parameter ini penulis kembangkan dari pemodelan fungsi dinamika harian gradien iklim mikro di tepi hutan mangrove. Parameter-parameter iklim mikro berhubungan satu sama lain dan dikembangkan berdasarkan perubahan temporal dan variasi spasial iklim mikro.

4.2.1. Perbedaan kuantitas iklim mikro antara posisi di luar hutan, di tepi dan di dalam hutan, dan antara siang dengan malam hari.

Perbedaan maksimum besaran iklim mikro antara lingkungan (misalnya lahan terbuka), tepi dan dalam hutan digunakan peneliti antara lain untuk mendeskripsikan kemampuan hutan mereduksi pengaruh radiasi matahari, dan fluktuasi energi termal yang terjadi di lingkungan. Batasan —di dalam hutan— yang digunakan para peneliti adalah posisi dalam hutan dimana besaran variabel iklim mikro mulai stabil. Perbedaan maksimum besaran iklim mikro di dalam dan di luar hutan terjadi pada siang hari karena pasokan energi matahari. Perbedaan kuantitas iklim mikro siang dan malam hari memberikan informasi tentang kapasitas ekosistem hutan dalam menyimpan energi yang diterima dari matahari dan yang diubah menjadi panas laten dan panas sensible. Perbedaan besaran iklim mikro siang dan malam hari juga menunjukkan perubahan difusi termal (kuantitas dan arah aliran fluks termal) antara lingkungan dengan ekosistem hutan.

Perbedaan besaran iklim mikro antara ekosistem hutan dengan lingkungan bergantung pada kondisi lingkungan, misalnya luas area terbuka. Spittlehouse *et al.* 2004 mengemukakan bahwa untuk area terbuka berukuran besar, suhu udara di luar hutan 2–3 °C lebih tinggi dari dalam hutan. Suhu udara minimum di luar hutan sama dengan dalam hutan. Suhu permukaan tanah pada lahan terbuka berukuran besar, 4 – 6 °C lebih tinggi dari suhu permukaan tanah dalam hutan. Suhu udara dan tanah pada area terbuka berukuran kurang dari 0.1 ha, tidak berbeda dengan suhu udara dan tanah dalam hutan. Di tempat terbuka berukuran besar, kelembaban udara dimusim panas, 5 – 10 % lebih rendah dari dalam hutan. Perbedaan maksimum suhu udara dalam hutan dengan lingkungan terbuka pada siang hari untuk tinggi pohon 1,5 sampai 2 m bervariasi antara 3°C (Brosofske *et al.*, 1997; Davies-Colley *et al.*, 2000; Spittlehouse *et al.*, 2004) hingga 6 °C atau lebih (Young and Mitchell, 1994; Chen *et al.*, 1995; Cadenasso *et al.*, 1997). Pada waktu malam, suhu udara dalam hutan 1°C lebih tinggi dari tempat terbuka (Chen *et al.*, 1995; Spittlehouse *et al.*, 2004)

Pada siang hari, suhu tanah di bawah kanopi hutan lebih rendah 10 sampai 15 °C dari tempat terbuka, sedangkan pada malam hari suhu tanah di bawah kanopi hutan lebih tinggi 1 sampai 2 °C dari tempat terbuka (Chen *et al.*, 1995; Brosofske *et al.*, 1997). Menurut Spittlehouse *et al.* (2004), kelembaban udara dan deficit tekanan uap bergantung pada suhu udara. Pada siang hari, suhu udara di dalam hutan lebih rendah, sedangkan kelembaban relatif dalam hutan lebih tinggi 5 hingga 25 % daripada di tempat terbuka (Chen *et al.*, 1995; Brosofske *et al.*, 1997; Davies-Colley *et al.*, 2000; Spittlehouse *et al.*, 2004). Untuk area terbuka yang besar, kecepatan angin di bawah kanopi hutan biasanya 10 hingga 20 % dari kecepatan di tempat terbuka (Raynor, 1971; Chen *et al.*, 1995; Davies-Colley *et al.*, 2000). Untuk luas area terbuka kurang dari 0.1 ha, kecepatan angin di tempat terbuka rendah, hampir sama dengan kecepatan angin dalam hutan (Spittlehouse *et al.*, 2004).

Hasil penelitian Heinke *et al.* (2009), menyimpulkan bahwa kanopi hutan dapat mereduksi suhu udara luar sebesar 6%, atau dari 23.6 menjadi 22.1 °C (suhu dalam hutan). Kanopi hutan juga dapat mereduksi suhu tanah sekitar 9 % dari suhu luar atau dari 22 menjadi 20 °C. Selisih kelembaban relative tertinggi antara bagian dalam hutan dengan lingkungan terbuka adalah 6 % (kelembaban dalam hutan lebih tinggi dari lingkungan). Selisih rata-rata harian kelembaban udara dalam hutan dengan lingkungan terbuka adalah 3 % (kelembaban dalam hutan lebih tinggi dari lingkungan).

Hasil penelitian Hawley (2010), menunjukkan pengaruh tutupan kanopi terhadap suhu air maksimum di kolam terbuka dan kolam dalam hutan. Hawley mencatat suhu air maksimum di kolam terbuka (33.67 ± 0.46 °C) sedangkan di kolam dalam hutan (24.64 ± 0.19 °C). Pada siang hari, suhu air maksimum di kolam terbuka 7.0–9.0 °C lebih tinggi dari kolam dalam hutan. Suhu air kolam di tepi hutan maksimum (26.13 ± 0.35 °C). Suhu air minimum harian lebih panas di kolam terbuka (25.16 ± 0.06 °C) dibandingkan kolam di tepi (24.18 ± 0.15 °C) dan di dalam hutan (23.75 ± 0.19 °C). Hasil penelitian Hawley ini menunjukkan bahwa kanopi hutan signifikan mempengaruhi perubahan suhu air dan suhu air maksimum di dalamnya. Hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan besaran iklim mikro di dalam dan di luar hutan sangat bergantung pada kondisi habitat tepi terutama tutupan kanopi dan kondisi lingkungan berbatasan (ukuran area terbuka, kondisi vegetasi seperti kerapatan, usia pohon dan tinggi tegakan, adanya sumber termal dll.).

4.2.2. Kedalaman Efek tepi

Menurut Matlack (1994), efek tepi hutan terjadi antara dua habitat berbeda yang terpisah secara tajam. Murcia (1995) mengemukakan bahwa dampak bertemunya dua kondisi lingkungan yang berbeda terhadap tumbuhan dan hewan di sebut efek tepi. Efek tepi tidak hanya terjadi pada batas fragmen hutan (misalnya batas hutan dengan area terbuka, atau laut, atau area pemukiman), tapi juga pada batas tambalan atau batas antar hutan yang berbeda jenis, berbeda usia, berbeda tinggi tegakan, berbeda kerapatan kanopi dll. (Malcolm J.R. 1994; Chen *et al.*, 1995; Benitez-Malvido, 1998; Didham and Lawton, 1999;

Cadenasso *et al.*, 2003; Saunders *et al.*, 2003 ; Ries *et al.*, 2004; Laurance *et al.*, 2006; Nascimento, 2006; Ewers *et al.*, 2007).

Efek tepi digunakan untuk mengkarakterisasi kondisi hutan dan pengaruh luar (lingkungan berbatasan) terhadap perubahan yang terjadi pada habitat tepi hutan. Efek tepi meliputi kondisi biotik dan abiotik (Murcia, 1995). Efek tepi biotik mencakup keragaman dan konsentrasi biota, pola migrasi biota, area predator dll. Efek tepi abiotik dalam hal ini iklim mikro, meliputi: intensitas radiasi atau kuat penerangan matahari, suhu udara dan tanah, kelembaban udara dan tanah, kecepatan angin dll. Penyinaran matahari sebagai pengendali energi bagi biota dalam hutan, mempengaruhi hubungan efek tepi abiotik dan biotik. Efek tepi yang ditunjukkan oleh keberadaan dan pergerakan species biota dalam habitat tepi berkaitan dengan perubahan temporal dan spasial iklim mikro (Brososke *et al.*, 1997; Fagan *et al.*, 1999; Chen *et al.*, 1999; Zheng *et al.*, 2000; Cadenasso *et al.*, 2001; Haynes and Cronin, 2006; Morrisey *et al.*, 2007; Laurence, 2008; Rambo and North, 2008).

Kedalaman efek tepi didefinisikan sebagai jarak dari tepi ke dalam hutan yang masih dipengaruhi perubahan biotik dan/atau abiotik lingkungan (luar) yang berbatasan dengan ekosistem (fragmen) hutan (Cadenasso *et al.*, 2003; Laurance *et al.*, 2007). Kedalaman efek tepi ini berkaitan dengan lebar habitat tepi. Kedalaman efek tepi iklim mikro pada dasarnya berubah sepanjang hari (Murcia, 1995; Ries *et al.*, 2004; Didham *et al.*, 1998; Laurance, 2002; Ewers and Didham, 2006), akibat perubahan kuantitas energi radiasi cahaya dan energi termal, serta aliran fluks termal yang terjadi karena perbedaan kuantitas termal dalam habitat tepi, dan antara fragmen hutan dengan lingkungan. Penetrasi maksimum efek tepi iklim mikro (harian) digunakan sebagai acuan untuk menetapkan zona habitat tepi (Fagan *et al.* 1999; Ewers *et al.*, 2007).

Laurance *et al.* (2007) mengemukakan faktor-faktor yang mempengaruhi variasi efek tepi meliputi: usia tepi habitat, aspek-aspek tepi, efek ganda dari tepi berdekatan (matriks), ukuran fragmen, struktur vegetasi matriks berbatasan, keadaan musim, masuknya hewan atau penyebaran tumbuhan dari lahan sekitar yang mengalami degradasi, perubahan iklim ekstrim dan pembakaran. Faktor-faktor ini mempengaruhi kedalaman efek tepi biotik, dan merupakan kondisi ekologis yang mempengaruhi efek tepi abiotik (iklim mikro). Kedalaman dan pola perubahan efek tepi abiotik bergantung pada energi radiasi cahaya yang masuk ke bawah kanopi (penetrasi langsung, difusi dari celah kanopi dan difusi horizontal), dan kuantitas energi yang dirubah menjadi panas dan kemudian diemisikan sebagai radiasi termal. Variasi temporal efek tepi iklim mikro dipengaruhi oleh penyinaran matahari, sedangkan pada malam hari bergantung pada energi yang tersimpan dalam ekosistem hutan dan lingkungan. Variasi spasial efek tepi iklim mikro mengikuti difusi termal antara lingkungan dengan ekosistem hutan. Efek tepi biotik dan abiotik menjadi indikator kondisi ekosistem, perubahan kondisi ekosistem (struktur vegetasi dll), dan pengaruh lingkungan terhadap ekosistem.

Penelitian efek tepi untuk mengkarakterisasi iklim mikro ekosistem hutan antara lain dilakukan oleh peneliti berikut ini. Penelitian oleh Didham and Lawton

(1999) yang menyimpulkan bahwa penetrasi efek tepi untuk kebanyakan variabel iklim mikro dan struktur vegetasi pada tepi terbuka, dua hingga lima kali dari penetrasi tepi pada tepi tertutup. Perbedaan besaran ini menunjukkan bahwa struktur tepi adalah satu diantara determinan utama iklim mikro dan struktur vegetasi pada fragmen hutan tropis (Chen *et al.*, 1995; Davies-Colley *et al.*, 2000; Laurence *et al.*, 2007). Spittlehouse *et al.* (2004) yang meneliti efek tepi suhu udara menyimpulkan bahwa area terbuka berukuran lebih dari 1 ha menyebabkan penetrasi efek tepi suhu udara hingga jarak 25 m ke dalam hutan, sedangkan Kapos (1989), mencatat kedalaman pengaruh efek tepi iklim mikro mencapai 40 m dari tepi ke arah hutan. Hasil penelitian Spittlehouse *et al.* (2004), juga menyimpulkan bahwa kedalaman efek tepi kelembaban udara sama dengan suhu udara. Davies-Colley *et al.* (2000) menyimpulkan bahwa pada jarak 80 dari tepi ke dalam hutan, kuat penerangan 0.7% dan kecepatan angin hanya 20% dari kuat penerangan dan kecepatan angin di tempat terbuka. Penelitian efek tepi komponen biotik juga telah banyak dilakukan, antara lain oleh Clark and Gilbert (1982), Lidicker (1999), Manson *et al.* (1999), Cubina and Aide (2001), Laurence *et al.* (2007).

Hubungan perubahan struktur, efek tepi iklim mikro dan keberadaan species biota antara lain dikemukakan dalam penelitian berikut ini. Hasil-hasil penelitian (Gladstone and Schreider, 2003; Dunham *et al.*, 2003; Morrisey *et al.*, 2007; Burton and Travis, 2008), membuktikan bahwa gangguan pada struktur hutan mangrove akan diikuti proses-proses fisis yang akan membawa efek pada tumbuhan dan hewan. Perombakan mangrove sangat signifikan dampaknya pada komunitas vegetasi dan habitat fauna tertentu. Godefroid and Koedam (2003) mengemukakan bahwa bagian tepi mengandung sejumlah species yang tidak toleran terhadap naungan (*shade-intolerant species*) dan juga tumbuhan pionir sedangkan pada bagian dalam hampir eksklusif ditempati species yang toleran terhadap naungan. Hasil penelitian Gehlhausen *et al.* (2000), menyatakan bahwa kekayaan species berkaitan erat dengan variasi iklim mikro, khususnya cahaya dan kelembaban tanah, namun banyak species menunjukkan pengaruh efek tepi kedua variabel ini yang berbeda kedalamannya. Perombakan hutan akan terdeteksi pada perubahan efek tepi iklim mikro (Tamatamah, 2007; Ma *et al.*, 2010) karena terjadi perubahan ukuran, struktur dan komposisi hutan dan akhirnya berdampak pada keberadaan species biota (Newmark, 2001; Laurence *et al.*, 2002). Variabel-variabel iklim mikro dalam hal ini menunjukkan efek tepi (Gehlhausen *et al.*, 2000); perubahan efek tepi iklim mikro dapat dijadikan indikator perubahan ekosistem hutan. Laurence (2008) mengemukakan bahwa efek tepi mengubah dinamika hutan dan banyak fitur pohon, sehingga menyebabkan pergeseran komposisi species, arsitektur

hutan dan iklim mikro. Hasil penelitian Laurence ini menunjukkan bahwa efek tepi tidak sekedar menjadi indikator kondisi ekosistem hutan pada keadaan normal, tapi juga dapat menunjukkan kondisi kritis karena perubahan ekstrim di lingkungan. Perubahan kedalaman efek tepi iklim mikro menjadi indikator terjadinya perubahan kuantitas termal dalam ekosistem hutan (misalnya karena peningkatan penetrasi matahari akibat berkurangnya tutupan kanopi), atau pada lingkungan berbatasan antara lain akibat perombakan area hutan, aktivitas yang mengemisi termal dll. Data efek tepi iklim mikro hutan dibutuhkan sebagai acuan monitoring-evaluasi dampak pemanasan global terhadap ekosistem hutan. Dalam penelitian iklim mikro di hutan mangrove, penulis mengembangkan metode penentuan kedalaman efek tepi berdasarkan fungsi gradient iklim mikro hasil pemodelan data lapangan dari sepuluh transek yang berbeda kondisi ekosistem dan lingkungan. Secara matematis fungsi kedalaman efek tepi dicapai apabila nilai gradient sama dengan nol, atau fungsi spasial iklim mikro menjadi konstan. Sebagai contoh, jika $T(x)$ menyatakan fungsi spasial iklim mikro maka gradientnya adalah fungsi turunan pertama : $gT(x) = dT(x)/dx$. Kedalaman efek tepi adalah harga x untuk harga fungsi gradient sama dengan nol ($gT(x) \approx 0$). Fungsi spasial iklim mikro dan fungsi gradient, berubah sepanjang hari karena perubahan intensitas penyinaran, emisi dan difusi termal. Ini berarti bahwa harga x juga bervariasi sepanjang hari. Kedalaman efek tepi variabel iklim mikro adalah jarak x terbesar dari antara data harga x sepanjang hari yang diperoleh dari hasil pemodelan.

Hasil penelitian kedalaman efek tepi variabel iklim mikro (kuat penerangan, suhu udara, kelembaban udara, dan suhu tanah/air) adalah sebagai berikut. Kedalaman efek tepi kuat penerangan cahaya matahari untuk kesepuluh transek penelitian bervariasi antara 24.55 m hingga 26.03 m. Hasil penelitian tidak menunjukkan pola atau hubungan yang jelas antara kondisi ekosistem dan lingkungan berbatasan, dengan kedalaman efek tepi kuat penerangan. Kendati demikian, semua transek menunjukkan waktu tercapainya kedalaman efek tepi maksimum pada jam 12.00. Hal ini dapat diinterpretasi bahwa pada jam 12.00 kuat penerangan matahari mencapai puncak, dan pada jam tersebut penetrasi radiasi matahari melalui celah kanopi menjadi maksimal. Penggunaan parameter kedalaman efek tepi kuat penerangan untuk karakterisasi iklim mikro ekosistem hutan perlu diteliti lebih lanjut, antara lain mengukur pantulan radiasi cahaya oleh air laut dan kanopi, serta pengaruh difusi radiasi cahaya melalui celah kanopi.

Kedalaman efek tepi suhu udara pada siang hari untuk kesepuluh transek bervariasi antara 22,1 m hingga 46,34 m. Kedalaman efek tepi suhu udara pada malam hari bervariasi antara 20,07 m hingga 27,9 m. Kedalaman efek tepi suhu udara terbesar siang hari ditemukan pada transek menghadap laut terbuka dan di bagian dalam (berbatasan dengan pantai) terdapat celah yang cukup lebar.

Kendatipun tutupan kanopinya tinggi, namun celah yang ada di bagian belakang mempengaruhi kenaikan suhu udara dalam hutan mangrove dan akibatnya kedalaman efek tepi bertambah jauh. Hasil penelitian ini bersesuaian dengan hasil-hasil penelitian di hutan (diantaranya Didham and Lawton, 1999; Spittlehouse *et al.*, 2004; Godefroid *et al.*, 2006), dan dalam hutan mangrove oleh Hernandez (2001) dan Mohamed *et al.* (2009). Secara umum, tepi mangrove yang berbatasan dengan laut terbuka menunjukkan kedalaman efek tepi siang hari lebih jauh dibanding tepi yang berbatasan dengan pantai ditumbuhi vegetasi. Hal ini berkaitan dengan fluktuasi suhu lingkungan yang mempengaruhi kedalaman efek tepi. Laut terbuka menunjukkan fluktuasi suhu udara (pada siang hari) lebih besar dibanding pantai yang ditumbuhi belukar atau pepohonan. Perbandingan kedalaman efek tepi suhu udara malam hari menunjukkan kecenderungan (walaupun dengan selisih kedalaman yang kecil) kedalaman efek tepi lebih jauh pada hutan dengan tutupan kanopi tinggi. Data (luaran) parameter efek tepi suhu udara yang berbeda untuk kondisi ekosistem dan lingkungan berbeda membuktikan bahwa parameter ini dapat digunakan untuk mengkarakterisasi iklim mikro hutan mangrove.

Kedalaman efek tepi kelembaban udara pada siang hari bervariasi antara 24,42 % hingga 54,49 %. Pada malam hari, kedalaman efek tepi kelembaban udara bervariasi antara 21,50 % hingga 35,06 %. Berdasarkan data kedalaman efek tepi kelembaban udara pada sepuluh transek, dapat disimpulkan bahwa transek dengan tutupan kanopi tinggi menunjukkan kedalaman efek tepi kelembaban udara yang lebih jauh pada siang maupun malam hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa transek yang kedalaman efek tepi suhunya jauh, efek tepi kelembaban udaranya juga jauh. Hasil ini sama dengan hasil penelitian Spittlehouse *et al.* (2004) yang dilakukan di hutan. Hal ini dapat dipahami karena variabel kelembaban udara dan suhu udara saling mempengaruhi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter efek tepi kelembaban udara dapat digunakan untuk mengkarakterisasi iklim mikro hutan mangrove.

Kedalaman efek tepi suhu tanah/air siang hari bervariasi antara 8,54 m hingga 27,24 m, sedangkan pada malam hari bervariasi antara 10,19 m hingga 13,86 m. Tidak ada pola atau hubungan yang jelas antara kondisi ekosistem dengan kedalaman efek tepi suhu tanah/air, siang maupun malam hari. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan suhu air dalam hutan mangrove tidak semata dipengaruhi radiasi matahari (siang hari) dan energi yang tersimpan dalam hutan mangrove (malam hari), tapi turut dipengaruhi oleh perubahan massa dan aliran air laut, dan air sungai yang mengandung energi termal berbeda. Penggunaan parameter kedalaman efek tepi suhu tanah/air untuk karakterisasi iklim mikro hutan mangrove, perlu diteliti lebih lanjut.

4.2.3. Gradien

Gradien iklim mikro berkaitan dengan perubahan spasial iklim mikro sepanjang transek memotong tepi hutan ke arah tengah hutan. Definisi umum gradien adalah perubahan besaran iklim mikro (intensitas cahaya atau kuat penerangan, suhu udara, suhu tanah, kelembaban udara, kelembaban tanah) persatuan jarak. Dalam sistem satuan internasional, satuan gradien untuk kuat penerangan adalah lux/m; untuk suhu $^{\circ}\text{C}/\text{m}$; untuk kelembaban $\%/ \text{m}$. Gradien sepanjang transek pada dasarnya adalah sebuah fungsi dengan kemungkinan nilai nol, konstan atau variabel. Misalnya untuk fungsi spasial suhu udara ($T(x)$), fungsi gradien adalah $dT(x)/dx$ (Edinger *et al.*, 1968 dalam Moore *et al.*, 2005). Nilai gradien nol sepanjang transek menunjukkan bahwa variabel iklim mikro tersebut tidak berubah atau konstan. Nilai gradien konstan menunjukkan bahwa variabel iklim mikro berubah secara linier sepanjang transek. Untuk variasi spasial iklim mikro yang lebih kompleks, gradien iklim mikro sepanjang transek berupa variabel dan berpola non linier. Untuk fenomena difusi energi, variasi spasial distribusi energi berbentuk eksponensial, sehingga fungsi gradien juga berbentuk eksponensial. Nilai gradien nol memiliki makna fisis-ekologis penting. Nilai gradien nol sepanjang transek menunjukkan waktu terjadinya kesetimbangan termal antara lingkungan dengan ekosistem hutan. Jika mulai dari jarak tertentu (misalnya x_1) ke arah tengah hutan, nilai gradien nol maka kondisi termal mulai dari jarak tersebut stabil. Jarak x_1 merupakan batas pengaruh difusi termal lingkungan berbatasan. Batas pengaruh difusi termal ini dikenal sebagai kedalaman efek tepi iklim mikro (intensitas cahaya atau kuat penerangan, suhu udara, suhu tanah, kelembaban udara, kelembaban tanah).

Perubahan kondisi termal sepanjang hari akibat perubahan intensitas radiasi cahaya yang diterima permukaan bumi, serta variasi emisi termal oleh komponen ekosistem hutan dan lingkungan, menyebabkan gradien iklim mikro bervariasi secara temporal dan spasial. Fungsi gradien (sebagai pola perubahan spasial sepanjang transek) berubah-ubah sepanjang hari. Newmark (2001) mengemukakan bahwa gradien iklim mikro tidak konstan sepanjang hari tapi berubah mengikuti penyinaran matahari. Chen *et al.* (1993), Godefroid and Koedam (2003), mengemukakan bahwa gradien iklim mikro sepanjang transek memotong tepi hutan berbentuk eksponensial. Kesimpulan ini pada dasarnya hanya merupakan keadaan sesaat. Fungsi spasial iklim mikro dan gradien iklim mikro berubah sepanjang hari bergantung pada penyinaran dan difusi termal antara ekosistem hutan dengan lingkungan, dan antar komponen ekosistem. Penelitian dan analisis gradien iklim mikro (suhu udara, kelembaban udara, suhu tanah/air) di hutan mangrove oleh penulis menunjukkan perubahan temporal fungsi gradien bersifat periodik (sinusoidal). Sebagai contoh, pada siang hari, gradien suhu udara berbentuk eksponensial negatif, lebih terjal di tepi dan berkurang menurut pertambahan jarak dari tepi ke dalam hutan. Hal ini

bersesuaian dengan difusi termal dari lingkungan ke dalam ekosistem hutan mangrove. Sore hari sekitar jam 18.30 fungsi gradien suhu udara menjadi nol (datar) dimana tidak ada aliran atau fluks termal antara lingkungan dengan ekosistem hutan mangrove. Malam hari, fungsi gradien berbentuk eksponensial positif, harga gradien lebih tinggi di dalam hutan dibanding di tepi dan di atas permukaan laut terbuka. Jika kita melakukan tinjauan pada masing-masing titik dalam transek dari tepi ke tengah hutan, maka pola perubahan harian besaran iklim mikro menunjukkan bentuk periodik sinusoidal.

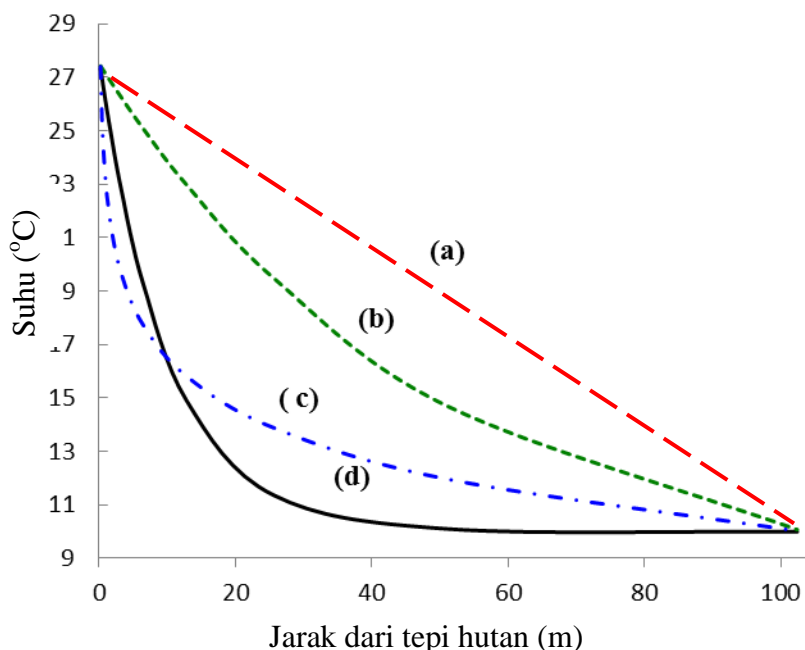
Gradien iklim mikro merupakan parameter yang sangat menarik dan sejak lama telah digunakan peneliti untuk mengkarakterisasi iklim mikro ekosistem hutan (Kapos, 1989; Williams-Linera, 1990; Ashton, 1992; Liechty *et al.*, 1992; Chen *et al.*, 1993; Camargo and Kapos, 1995; Ehrenfeld *et al.*, 1997; Davies-Colley *et al.*, 2000; Redding *et al.*, 2003; Nelson *et al.*, 2007; Gradstein, 2008; Broadbent *et al.*, 2008; Heithecker and Halpern, 2011). Dalam beberapa artikel, gradient iklim mikro tidak didefinisikan secara eksplisit untuk memberikan deskripsi kuantitatif tentang perubahan variabel iklim mikro sepanjang transek dari tepi ke tengah hutan. Parameter gradien sering tidak jelas dibedakan dengan variasi spasial (*spatial variability*) iklim mikro. Gradien iklim mikro berkaitan dengan variasi spasial iklim mikro dari tepi ke dalam hutan. Beberapa peneliti (Chen *et al.*, 1995; Brososfske *et al.*, 1997; Davies-Colley *et al.*, 2000;) menyatakan gradien sebagai perubahan spasial variabel iklim mikro dalam kategori: terjal – landai – datar. Besaran gradien sering disatukan dengan kedalaman pengaruh tepi atau efek tepi (Chen *et al.*, 1995; Dong *et al.*, 1998; Davies Colley *et al.*, 2000;). Misalnya, Chen *et al.*, (1995) mengemukakan: secara keseluruhan gradien variabel suhu udara, kelembaban udara, dan suhu tanah, lebih panjang (*longest*) dan lebih terjal (*steeper*) pada area hutan yang ditebang parsial (*partially clear*).

Beberapa peneliti merumuskan gradien secara kuantitatif sebagai perbandingan antara selisih suhu tepi dengan posisi dalam hutan dimana variabel iklim mikro menjadi konstan, terhadap jarak posisi tersebut dari tepi (Chen *et al.* 1995; Renhorn *et al.* 1997; Williams-Linera *et al.* 1998; Davies Colley *et al.*, 2000; Gehlhausen *et al.* 2000; Newmark 2001; Cienciala *et al.* 2002; Godefroid *et al.*, 2006). Gradien ini dikenal sebagai gradien iklim mikro tepi – interior hutan.

Godefroid *et al.* (2006) menyatakan pada gradien 10°C untuk jarak 120 m, suhu udara secara spasial lebih berfluktuasi dibanding suhu tanah, karena untuk jarak tersebut, suhu tanah hanya berubah 2.8°C . Davies Colley *et al.* (2000) menyatakan bahwa gradien cahaya sangat terjal dengan level karakteristik atau kondisi stabilnya tercapai dalam jarak 5 m. Pendekatan tepi-interior hutan yang digunakan Davies Colley *et al.* (2000), Godefroid *et al.*, (2006), menggambarkan sekaligus kedalaman efek tepi dengan selisih terbesar harga variabel iklim mikro di tepi dengan bagian dalam hutan.

Pinto *et al.* (2010) mengemukakan bahwa konfigurasi iklim mikro tidak berkorelasi linier dengan jarak dari tepi. Hasil penelitian Pinto *et al.* secara fisis membuktikan bahwa perubahan iklim mikro dari tepi ke tengah hutan merupakan proses difusi energi termal yang berbentuk eksponensial. Hasil

penelitian ini menjadi koreksi terhadap penetapan gradien iklim mikro sebagai perbandingan antara selisih harga variabel iklim mikro di tepi dengan posisi dalam hutan dimana variabel suhu udara mulai stabil, dibagi jarak dari tepi ke posisi yang bersangkutan. Grafik (a) dalam Gambar-4.1. memperlihatkan variasi spasial dan penentuan gradien iklim mikro, dengan pendekatan tepi-interior hutan secara linier. Data gradien iklim mikro yang dihasilkan menggambarkan sekaligus kedalaman efek tepi dan selisih harga variabel iklim mikro di tepi dengan bagian dalam hutan, namun sulit untuk dijadikan indikator karakterisasi iklim mikro ekosistem hutan. Perlu diingat bahwa fungsi dan harga gradien berubah dari waktu ke waktu secara periodik sepanjang hari. Selama proses difusi termal, terjadi perubahan besaran iklim mikro (ordinat dari Gambar-4.1) sekaligus kedalaman pengaruh difusi termal (absis dari Gambar-4.1). Perbandingan perubahan ordinat dan absis belum tentu sejalan, sehingga nilai gradien tertinggi sangat mungkin terjadi bukan pada saat selisih suhu udara tertinggi atau pada saat pengaruh difusi termal terjauh ke dalam hutan. Jika demikian besaran gradien model linier tepi- interior hutan, tidak dapat digunakan sebagai parameter karakterisasi iklim mikro.



Gambar-4.1. Variasi spasial iklim mikro sepanjang transek dari tepi ke dalam hutan

Nelson *et al.* (2007), melakukan penelitian dan mendeskripsikan gradien suhu udara sebagai perbandingan selisih suhu dengan jarak antar stasion pengukuran. Mereka mendapatkan besaran gradien untuk jarak 7,6 m, 22,9 m, dan 45,7 m masing-masing 0.32 °C/m, 0.03 °C/m dan 0.02 °C/m. Data yang dihasilkan menunjukkan perubahan nilai gradien sepanjang transek. Mirip dengan pendekatan yang dilakukan Nelson *et al.*, Mendoza *et al.* (2005),

mendeskripsikan gradien sebagai selisih besaran iklim mikro untuk setiap jarak 1 m dari tepi ke dalam hutan. Pendekatan yang digunakan Mendoza *et al.* ini akan menghasilkan sederetan data (rasio) gradien yang berkurang dari tepi ke dalam hutan. Grafik gradien ini akan berbentuk eksponensial seperti grafik **b**, **c**, dan **d** dalam Gambar-4.1. Pendekatan yang dikembangkan Mendosa *et al.* mendeskripsikan difusi termal antara lingkungan dengan ekosistem hutan. Beberapa informasi penting yang diperoleh dari hasil penelitian gradien iklim mikro yakni:

a. Perbedaan gradien antar variabel iklim mikro

Gradien iklim mikro di tepi hutan dipengaruhi oleh struktur vegetasi dan kapasitas lingkungan dalam mereduksi cahaya, mengemisi radiasi termal dan mentransmisi energi termal ke dalam hutan. Kendatipun perubahan iklim mikro di sekitar batas hutan dikendalikan oleh penyinaran matahari dan difusi termal (Chen *et al.*, 1993; Davies-Colley *et al.*, 2000), harga gradien di tepi dan kedalaman pengaruh lingkungan berbeda-beda antara variabel iklim mikro (Gehlhausen *et al.*, 2000; Newmark, 2001; Godefroid *et al.*, 2006;). Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat penerangan (Chen *et al.*, 1995;) dan suhu tanah (Gehlhausen *et al.*, 2000; Davies-Colley *et al.*, 2000;) serta kecepatan angin memiliki gradien paling terjal (Spittlehouse, 2004). Kelembaban relatif memiliki gradien paling lebar (mencapai jarak terjauh ke dalam hutan) (Gehlhausen *et al.*, 2000).

Hasil penelitian Godefroid *et al.* (2006) menunjukkan bahwa suhu udara secara spasial lebih berfluktuasi dibanding suhu tanah. Untuk jarak 120 m, Godefroid *et al* mencatat beda suhu udara mencapai 10°C sedangkan suhu tanah $2,8^{\circ}\text{C}$. Hasil berbeda ditunjukkan oleh Chen and Franklin, 1997, bahwa secara spasial suhu tanah lebih bervariasi daripada suhu udara. Untuk pohon berusia tua di Douglas-fir forest, mereka menemukan variasi suhu udara sebesar $2,7^{\circ}\text{C}$ untuk jarak 200 meter dari tepi, sedangkan suhu tanah bervariasi sebesar $5,9^{\circ}\text{C}$. Perbedaan seperti ini sangat wajar, karena perbedaan komponen ekosistem dan lingkungan berbatasan dalam menyerap energi cahaya, mengemisi radiasi termal dan mentransmisi energi termal melalui konduksi (tanah) dan difusi (udara). Perbedaan ini juga sangat ditentukan oleh struktur kanopi hutan. Ini membuktikan bahwa gradien iklim mikro merupakan karakteristik ekosistem dan lingkungan berbatasan.

b. Perubahan gradien sebagai indikator kesetimbangan energi

Gradien masing-masing variabel berubah dari waktu ke waktu karena pengaruh penyinaran dan difusi termal. Hasil penelitian Meyer *et al.* (2001) di hutan yang berbatasan dengan tempat terbuka menunjukkan bahwa gradien yang terjal untuk suhu udara dan defisit tekanan uap air terjadi pada pagi dan sore hari. Menurut Newmark (2001), gradien suhu udara dan defisit tekanan uap secara spasial variasinya rendah (gradien landai) namun secara temporal variasinya tinggi, sedangkan gradien intensitas radiasi matahari variasinya tinggi baik secara spasial maupun temporal. Moore *et al.* (2005) mengemukakan bahwa

pada bidang batas ekosistem, variabel-variabel iklim mikro: intensitas radiasi, suhu udara kelembaban udara, kecepatan angin akan mencapai satu kesetimbangan (sesaat) dimana tidak terjadi transfer energi melewati bidang batas. Ini membuktikan bahwa variabel-variabel iklim mikro dikendalikan oleh penetrasi cahaya, emisi termal dan difusi termal melewati batas ekosistem.

c. Pengaruh angin terhadap gradien iklim mikro

Angin merupakan variabel iklim mikro yang berubah sepanjang transek dari tepi ke bagian dalam hutan. Perubahan spasial kecepatan angin berbentuk eksponensial (Chen *et al.*, 1995). Perubahan temporal kecepatan angin tidak secara langsung dikendalikan oleh perubahan intensitas cahaya dan difusi termal dalam ekosistem. Angin merupakan variabel iklim global atau regional yang mengalami pengaruh lokal (struktur hutan) dan memberi pengaruh spasial pada variabel iklim mikro lainnya. Angin sebagai energi mempengaruhi struktur hutan. Yoko-o and Tokeshi (2011) mengemukakan bahwa karakteristik pohon mangrove yang bertumbuh pada batas daratan dengan laut, lebih pendek, dengan cabang bertingkat dan kanopi yang lebih terbuka (lebih banyak ruang antara cabang) dibanding bagian yang lebih dalam. Struktur ini disebabkan oleh pengaruh angin. Kondisi struktur ini menyebabkan penetrasi cahaya lebih tinggi pada area sekitar bidang batas mangrove-laut dan seterusnya menyebabkan variasi spasial variabel iklim mikro lainnya. Davies Colley *et al.* (2000) mengemukakan bahwa gradien iklim mikro bervariasi bergantung pada kecepatan dan arah angin. Jika arah angin keluar hutan, maka suhu udara dan kelembaban udara menjadi stabil pada jarak yang relatif dekat dari tepi hutan. Sebaliknya, jika angin bertiup ke dalam hutan, perubahan suhu udara dan kelembaban menjadi lebih jauh ke dalam hutan, mencapai jarak 60 m dari tepi hutan. Davies Colley *et al* menyarankan untuk pengukuran dengan memperhitungkan pengaruh angin yang bertiup ke arah hutan, jarak minimal adalah 40 meter dari tepi. Pada dua transek pengukuran dimana arah angin bertiup ke arah luar hutan, Davies-Colley *et al.* (2000) mendapatkan elevasi suhu udara 2^oC dan deficit tekanan uap air 2 mB dekat tepi hutan. Chen *et al.* (1993) melaporkan hasil yang sama tentang kondisi suhu udara dan kelembaban udara dalam pengukuran di tepi Douglas-fir forest.

d. Gradien iklim mikro untuk pemantauan ekosistem dan perubahan ekosistem

Pemantauan perubahan gradien iklim mikro di tepi dapat menunjukkan kapasitas ekosistem merespons perubahan energi termal di lingkungan berbatasan (Tabareli *et al.*, 2008). Data gradien tepi-interior memberi petunjuk tentang fungsi area pengaman terhadap pengaruh ekstrim dari luar seperti penyinaran yang berlebihan, dan pengaruh angin (Pohlman *et al.*, 2007). Area pengaman ini sensitif terhadap perubahan struktur vegetasi tepi dan secara temporal tidak konstan (Newmark, 2001). Kondisi gradien iklim mikro sepanjang transek memotong tepi tambalan habitat berkaitan dengan komposisi dan pertumbuhan vegetasi, proses-proses ekosistem dan gerakan hewan (Chen

et al., 1999). Perubahan struktur vegetasi karena penebangan atau proses alamiah (pertumbuhan, kerusakan) akan terdeteksi melalui perubahan gradien iklim mikro. Brososke *et al.* (1997) dan Naiman *et al.* (2000) mengemukakan bahwa gradien iklim mikro memiliki peran kunci dalam menentukan komposisi vegetasi daerah riparian.

e. Pentingnya data gradien iklim mikro untuk pemantauan species biota

Pentingnya data gradien iklim mikro terkait dengan keberadaan species biota antara lain dikemukakan oleh Gehlhausen *et al.* (2000), Gradstein (2008), dll. Menurut Gehlhausen *et al.* (2000), gradien iklim mikro dari tepi ke tengah hutan memberikan informasi tentang distribusi species dalam daerah tepi. Menurut Godefroid *et al.* (2007), gradien suhu udara dan kelembaban udara menunjukkan pengaruh signifikan terhadap keberadaan species tertentu dalam hutan. Karr and Freemark (1983) mengemukakan: gradien iklim mikro, khususnya suhu dan kelembaban udara merupakan faktor yang secara langsung menyebabkan tekanan fisiologis pada burung atau secara tidak langsung melalui pengaruhnya terhadap ketersediaan sumber makanan bagi burung. Goldblum and Beatty (1999) menemukan bahwa perubahan gradien iklim mikro potensial mempengaruhi peningkatan species dari luar datang ke daerah tepi hutan. Berbagai species biota yang hidup di habitat tepi dikendalikan oleh penyinaran dan fluks termal, yang terdeteksi melalui perubahan gradien iklim mikro (Gradstein, 2008). Gradstein mengemukakan bahwa nilai kekayaan species dalam hutan primer dan sekunder dapat saja tidak berbeda signifikan, namun sangat bergantung pada gradien. Fenomena ini diperkirakan akan sangat signifikan terjadi akibat pemanasan global di masa mendatang.

4.2.4. Gradien iklim mikro di tepi hutan (mangrove)

Penggunaan parameter gradien untuk mengkarakterisasi iklim mikro hutan oleh peneliti terdahulu lebih menekankan perubahan spasial dalam ekosistem hutan. Gradien dijelaskan berdasarkan pola perubahan spasial sepanjang transek, misalnya harga variabel iklim mikro pada saat terjadi perubahan paling terjal dan waktu tercapainya gradien tersebut. Idealnya gradien iklim mikro adalah sebuah besaran kuantitatif sehingga dapat secara tegas digunakan untuk karakterisasi ekosistem, misalnya membedakan transek pada ekosistem dan lingkungan yang berbeda, memantau perubahan dalam ekosistem dan/atau lingkungan dll. Data kuantitatif gradien iklim mikro dapat diperoleh dari pendekatan yang dikembangkan oleh Nelson *et al.* (2007), dan Mendoza *et al.* (2005). Luaran pendekatan ini merupakan perubahan harga gradien (perbandingan selisih besaran iklim mikro antara dua posisi dibagi jarak antara

kedua posisi). Luaran ini dapat menunjukkan perubahan spasial dalam bentuk angka, sepanjang transek dari tepi ke bagian dalam hutan.

Berdasarkan pemodelan matematik data empirik, dimulai dari pemodelan perubahan temporal (harian) diikuti pemodelan variasi spasial, penulis mengembangkan parameter gradien iklim mikro (kuat penerangan, suhu udara, kelembaban udara, suhu air/lumpur) di tepi hutan mangrove. Besaran gradien di tepi diperoleh dari fungsi gradien sepanjang transek mulai dari tepi ke dalam hutan. Dalam penelitian tersebut, penulis melakukan pengukuran variabel iklim mikro pada sembilan posisi secara berpindah (*mobile system*) sepanjang transek memotong tepi ke dalam hutan mangrove. Fungsi gradien iklim mikro diperoleh dengan mendiferensir fungsi spasial iklim mikro, hasil pemodelan data lapangan. Misalnya untuk variabel suhu udara, dengan fungsi spasialnya $T(x)$, maka gradiennya berbentuk fungsi $gT(x) = dT(x)/dx$ (seperti dikemukakan Edinger dalam Moore *et al.*, 2005). Fungsi perubahan spasial dan fungsi gradien iklim mikro merupakan keadaan sesaat, karena fungsi-fungsi tersebut berubah dari waktu ke waktu sepanjang hari mengikuti penyinaran matahari dan energi yang tersimpan (*stored energi*) dalam ekosistem dan lingkungan. Dari fungsi gradien dapat diperoleh besaran fisis : (1) harga gradien pada setiap posisi sepanjang transek (seperti luaran dari pendekatan Nelson *et al.*, 2007 dan Mendoza *et al.*, 2005), (2) harga gradient pada tepi hutan, dan (3) jarak terjauh (mendatar) perubahan spasial iklim mikro. Harga gradien sepanjang transek dari tepi ke tengah hutan dapat ditentukan dengan memasukan data jarak dari tepi (x) pada fungsi gradien ($gT(x)$). Gradien di tepi ($x = 0$) adalah $gT(0) = dT(x)/dx$ untuk $x = 0$. Jarak terjauh perubahan spasial iklim mikro diperoleh dengan menentukan posisi dimana harga fungsi gradien mendekati nol (atau menentukan harga x untuk $gT(x) \approx 0$). Harga x ini adalah kedalaman efek tepi iklim mikro. Perlu ditegaskan kembali bahwa harga gradien pada setiap posisi sepanjang transek dan di tepi serta kedalaman efek tepi berubah sepanjang hari karena pengaruh penyinaran matahari dan difusi energi yang tersimpan dalam ekosistem dan lingkungan berbatasan. Perubahan tersebut berbentuk periodik sinusoidal.

Pada bagian ini penulis memperkenalkan parameter gradien di tepi untuk karakterisasi iklim mikro hutan (mangrove). Nilai gradien iklim mikro di tepi dapat bervariasi dengan tanda positif atau negatif dan antara harga maksimum dan nol, bergantung variabel iklim mikro, kondisi ekosistem dan lingkungan berbatasan. Nilai gradien di tepi nol berarti tidak ada aliran fluks termal iklim mikro antara lingkungan dengan ekosistem hutan. Tanda gradien negatif (besaran iklim mikro berkurang dengan bertambahnya jarak dari tepi) menunjukkan aliran fluks termal dari lingkungan ke dalam ekosistem. Tanda

gradien positif menunjukkan aliran termal dari dalam ekosistem hutan ke lingkungan berbatasan. Nilai gradien tepi maksimum menunjukkan perbedaan tertinggi besaran iklim mikro antara lingkungan dengan ekosistem hutan.

Hasil penelitian gradien di tepi hutan mangrove pada sepuluh transek yang berbeda kondisi ekosistem dan lingkungannya adalah sebagai berikut. Gradien tepi maksimum untuk kuat penerangan cahaya matahari bervariasi antara 18.79 lux/m hingga 23.94 lux/m. Gradien tepi maksimum yang tinggi ditemukan pada tepi mangrove yang lebat dan berhadapan dengan laut terbuka. Gradien tepi maksimum yang rendah ditemui pada batas mangrove dengan pantai yang ditumbuhi pohon yang tinggi. Gradien tepi maksimum untuk suhu udara siang hari bervariasi antara 0,902 °C/m hingga 1,747 °C/m (tanda gradien negatif, fluks termal mengalir dari lingkungan ke dalam hutan mangrove). Gradien tepi suhu udara maksimum yang tinggi terdapat pada batas hutan mangrove (homogen dan lebat) dengan laut terbuka. Hutan mangrove yang tutupan kanopinya rendah, berbatasan dengan pantai yang ditumbuhi vegetasi menunjukkan gradien tepi suhu udara yang rendah. Gradien tepi suhu udara maksimum pada malam hari bervariasi antara 0,342 °C/m hingga 0,524 °C/m. Tanda gradien positif menunjukkan arah difusi termal dari dalam ekosistem mangrove ke lingkungan. Hutan mangrove yang lebat dan berbatasan dengan laut menunjukkan gradien tepi suhu udara yang lebih tinggi dibanding hutan mangrove dengan tutupan kanopi yang rendah dan berbatasan dengan pantai bervegetasi. Gradien tepi suhu udara pada malam hari lebih rendah dari siang hari, yang menunjukkan bahwa aliran fluks termal malam hari lebih rendah dari siang hari. Pada siang hari, lingkungan (laut terbuka) memperoleh pasokan energi langsung dari matahari sedangkan di bawah kanopi mangrove energi matahari hanya diperoleh dari proporsi sinar yang menembus celah kanopi dan difusi radiasi arah vertikal dan horizontal. Pada malam hari, fluks termal mengalir dari hutan mangrove ke lingkungan karena mangrove dapat menyimpan energi yang diterima pada siang hari, sedangkan tempat terbuka mengalami penurunan energi termal lebih cepat pada saat matahari terbenam.

Gradien tepi kelembaban udara (kelembaban relatif) siang hari bervariasi antara 2,021%/m hingga 3,037%/m. Gradien kelembaban udara tertinggi siang hari ditemukan pada tepi hutan mangrove yang lebat dan terdapat pasokan air segar dari daratan, sedangkan gradien kelembaban udara yang rendah ditemukan pada tepi hutan mangrove yang tutupan kanopinya rendah, berbatasan dengan pantai dan terdapat jalan aspal (pada jarak 15 m dari tepi mangrove). Pada malam hari gradien tepi kelembaban udara bervariasi antara 1,138 %/m hingga 1,78 %/m.

Pada malam hari, gradien tepi kelembaban udara pada tepi hutan mangrove yang lebat, berbatasan dengan tempat terbuka cenderung lebih tinggi dibanding hutan mangrove yang kurang lebat dan berbatasan dengan pantai bervegetasi.

Gradien tepi suhu tanah/air siang maupun malam hari lebih kompleks dibanding kuat penerangan, suhu udara dan kelembaban udara. Gradien tepi suhu tanah/air antar transek pada siang hari ada yang berbeda arah fluks termalnya, demikian halnya pada malam hari. Hal ini menunjukkan bahwa variasi suhu tanah/air

secara spasial tidak hanya dikendalikan oleh penyinaran matahari (waktu siang) dan energi tersimpan dalam hutan mangrove (waktu malam) tapi juga ada pengaruh aliran massa air dari laut dan daratan dengan kandungan energi yang berbeda. Pengembangan gradien tepi suhu tanah/air untuk menjadi parameter karakterisasi iklim mikro hutan mangrove membutuhkan pengembangan dan analisis lebih lanjut misalnya dengan mengontrol aktivitas pasut dan pasokan air segar dari daratan.

Hasil penelitian yang dilakukan penulis dan tim menunjukkan bahwa nilai gradien tepi maksimum berbeda antara transek dengan kondisi ekosistem dan lingkungan yang berbeda, sehingga gradien tepi iklim mikro (variabel kuat penerangan, suhu udara, kelembaban udara) dapat digunakan sebagai parameter karakterisasi iklim mikro hutan mangrove. Penentuan gradien tepi variabel iklim mikro, termasuk suhu tanah dalam hutan di daratan, dapat mengadopsi metode penentuan gradien ini sehingga dapat menghasilkan data kuantitatif yang dibutuhkan untuk karakterisasi, evaluasi dan pemantauan kondisi ekosistem hutan dan pengaruh perubahan lingkungan. Prosedur pemodelan matematik perubahan temporal (harian), variasi spasial, penentuan fungsi gradien, penentuan nilai gradien di tepi dan kedalaman efek tepi, time lag, serta luas bidang dinamika gradien harian (parameter baru yang dikembangkan penulis) dari data hasil pengukuran di lapangan, diuraikan dalam Bab-6.

4.2.5. Time lag penyinaran dengan perubahan iklim mikro

Dalam pembahasan sebelumnya telah banyak diuraikan tentang radiasi cahaya sebagai sumber energi yang mengendalikan emisi dan difusi termal dalam ekosistem hutan dan antara hutan dengan lingkungan. Emisi termal dan difusi termal yang teridentifikasi melalui variabel iklim mikro (suhu udara, kelembaban udara, suhu tanah) berubah dari waktu ke waktu mengikuti perubahan intensitas radiasi cahaya atau kuat penerangan matahari. Secara fisis, variabel suhu udara, kelembaban udara dan suhu tanah tidak secara langsung berubah bersamaan dengan perubahan kuat penerangan matahari. Ada selisih waktu (*time lag*) untuk proses absorpsi energi cahaya, perubahan energi yang diabsorpsi menjadi energi termal dan proses difusi dalam ekosistem dan antara ekosistem dengan lingkungan. Waktu untuk absorpsi, proses radiasi termal dan difusi termal akan bergantung pada sifat fisis materi (kapasitas panas jenis, konduktivitas atau difusivitas bahan) yang ada dalam ekosistem dan lingkungan. Ini berarti time lag antara perubahan kuat penerangan dengan variabel iklim mikro lainnya merupakan karakteristik dari ekosistem dan lingkungan berbatasan. Jika fluks termal mengalir dari lingkungan ke dalam ekosistem hutan (melalui tepi hutan), maka seharusnya bagian tepi hutan akan mengalami kenaikan energi termal terlebih dahulu, dan dengan demikian mengalami perubahan variabel iklim mikro terlebih dahulu dibanding dengan bagian yang lebih dalam.

Kendatipun parameter ini potensial untuk mengkarakterisasi ekosistem hutan dan membedakan ekosistem dan interaksi ekosistem dengan lingkungan, namun sangat jarang digunakan oleh peneliti terdahulu. Penggunaan parameter time lag

dapat dilakukan bervariasi, misalnya untuk membandingkan perubahan variabel iklim mikro karena perubahan struktur hutan, untuk menganalisis konduksi (melalui variabel suhu tanah, kelembaban tanah) atau difusi termal (melalui variabel suhu udara, kelembaban udara). Parameter time lag pernah digunakan oleh Zheng *et al.* (2000) terkait dengan penelitian pengaruh panen pohon ek terhadap perubahan spasial (vertikal) radiasi matahari, suhu udara, kelembaban udara dan suhu tanah. Zheng *et al.*, melakukan pengambilan data sebelum panen (tahun 1977) dan sesudah panen (tahun 1997 dan 1998). Hasil penelitian antara lain menunjukkan perubahan suhu permukaan tanah (kedalaman 0, 5, 10 cm) sesudah panen menjadi tiga kali lebih lambat daripada sebelum panen. Mereka menetapkan besaran time lag ini berdasarkan harga maksimum dan minimum perubahan harian suhu permukaan tanah. Sellars *et al.* (2001) melakukan penentuan time lag suhu udara pada bagian atas kanopi dengan bagian bawah kanopi menggunakan korelasi silang (antara data perubahan suhu udara di atas dan di bawah kanopi). Sellars *et al.* mencatat selisih waktu perubahan suhu udara di atas dan di bawah kanopi sebesar tiga jam (perubahan suhu udara di atas kanopi mendahului perubahan suhu udara di bawah kanopi). Hasil penelitian ini menunjukkan arah fluks termal dari atas ke bawah kanopi, dan waktu yang dibutuhkan kanopi mengabsorpsi energi radiasi cahaya dan mengemisi energi termal yang terukur pada suhu udara.

Penulis mengembangkan parameter time-lag antara perubahan kuat penerangan matahari dengan perubahan variabel iklim mikro lainnya (suhu udara, kelembaban udara, dan suhu permukaan air/tanah) dalam hutan mangrove. Penentuan time lag menggunakan analisis korelasi silang antara fungsi perubahan temporal (siang hari) kuat penerangan dengan variabel iklim mikro. Besaran time lag ditetapkan berdasarkan koefisien korelasi silang maksimum yang diperoleh dengan menggeser basis waktu fungsi kuat penerangan ($I(t+\tau)$) terhadap fungsi iklim mikro (misalnya suhu udara : $T(t)$). Harga τ yang menghasilkan koefisien korelasi silang maksimum adalah time lag antara kuat penerangan (I) dengan suhu udara (T). Analisis dilakukan dengan dua sasaran yakni: (1) mengevaluasi apakah parameter ini dapat digunakan untuk membedakan kondisi ekosistem hutan mangrove dan lingkungan berbatasan, (2) mengevaluasi apakah time lag dapat menunjukkan proses difusi termal (arah horizontal) dari luar ke dalam hutan dan sebaliknya. Pengembangan parameter time-lag ini merupakan bagian penting dari karakterisasi iklim mikro hutan, bersama parameter iklim mikro lainnya.

Hasil penelitian yang dilakukan penulis tahun 2010, menunjukkan bahwa time lag antara suhu udara dengan kuat penerangan di bawah kanopi mangrove bervariasi antara 1.1 hingga 1.5 jam, dengan pola semakin bertambah dari tepi ke dalam hutan. Time lag antara kelembaban udara dengan kuat penerangan bervariasi antara 0,6 hingga 1.5 jam, dengan pola semakin bertambah dari tepi ke dalam hutan. Time lag antara suhu tanah/air dengan kuat penerangan bervariasi antara 1.1 hingga 2.4 jam, dengan kenderungan semakin bertambah dengan bertambahnya jarak dari tepi ke dalam hutan. Luaran hasil analisis time lag ini berbeda antar transek yang berbeda kondisinya.

Perbedaan time lag antar transek yang berbeda kondisi ekosistem dan lingkungan berbatasan membuktikan perbedaan waktu dan kuantitas emisi dan difusi termal yang mempengaruhi variabel suhu udara, kelembaban udara dan suhu air/tanah. Hal ini merupakan karakteristik ekosistem dan lingkungan berbatasan, sehingga pengembangan parameter ini dapat digunakan sebagai bagian dari karakterisasi ekosistem hutan mangrove. Kecenderungan perubahan time-lag yang semakin besar dengan bertambahnya jarak dari tepi ke dalam hutan, membuktikan bahwa perubahan variabel suhu udara, kelembaban udara dan suhu tanah dipengaruhi oleh difusi termal dari luar/tepi hutan ke dalam hutan. Bagian luar yang terbuka dan memperoleh pasokan energi cahaya lebih besar, terlebih dahulu menjadi panas dan mengemisi radiasi termal, sehingga berlangsung difusi ke dalam hutan yang energi termalnya lebih rendah.

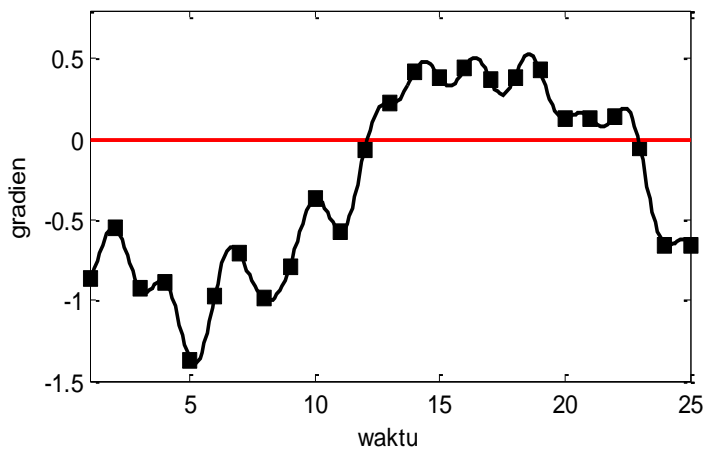
4.2.6. Luas bidang dinamika harian dan indeks dinamika harian gradien iklim mikro

Untuk mengkarakterisasi iklim mikro hutan mangrove, penulis mengembangkan parameter baru yakni luas bidang dinamika harian dan indeks dinamika harian gradien iklim mikro. Parameter ini merupakan lanjutan dan melengkapi data atau luaran parameter gradien tepi. Jika gradien tepi mendeskripsikan keadaan sesaat yakni perbedaan maksimum iklim mikro antara lingkungan dengan ekosistem hutan, maka luas bidang dinamika harian menunjukkan total gradien tepi harian. Berdasarkan pemodelan fungsi gradien dan penentuan gradien tepi, diperoleh pasangan data waktu (t) dengan gradien tepi (G(t)). Pemodelan pasangan data waktu-gradien tepi, menghasilkan fungsi dinamika gradien (contoh fungsi dinamika harian gradien suhu udara: persamaan-4.1) dengan grafik seperti Gambar-4-1. Pemodelan data dinamika harian gradien iklim mikro (sebagai fungsi waktu) menggunakan deret Fourier, karena gradien tepi berubah secara periodik-sinusoidal mengikuti difusi energi cahaya dan difusi energi termal antara lingkungan dengan ekosistem hutan.

$$G(t) = -0.294353 - 0.282 \cos(2\pi t)/12 - 0.705 \sin(2\pi t)/12 + 0.025 \cos(4\pi t)/12 + 0.046 \sin(4\pi t)/12 - 0.048 \cos(6\pi t)/12 - 0.031 \sin(6\pi t)/12 - 0.044 \cos(8\pi t)/12 + 0.066 \sin(8\pi t)/12 - 0.094 \cos(10\pi t)/12 + 0.0001 \sin(10\pi t)/12 - 0.081 \cos(12\pi t)/12 + 0.189 \sin(12\pi t)/12 + 0.0163 \cos(14\pi t)/12 - 0.278 \sin(14\pi t)/12 + 0.065 \cos(16\pi t)/12 + 0.0734 \sin(16\pi t)/12 - 0.0478 \cos(18\pi t)/12 - 0.004 \sin(18\pi t)/12 + 0.01 \cos(20\pi t)/12 - 0.058 \sin(20\pi t)/12 + 0.036 \cos(22\pi t)/12 + 0.002 \sin(22\pi t)/12 + 0.08 \cos(24\pi t)/12 - 0.040 \sin(24\pi t)/12$$

Gambar-4.1. menunjukkan perubahan gradien tepi suhu udara mulai dari jam 07.00 hingga jam 07.00 keesokan harinya. Posisi 1 dalam skala grafik menunjuk waktu jam 07.00; posisi 5: menunjuk jam 11.00, posisi 10: jam 16.00 dst. Antara jam 07.00 hingga 19.15 (skala grafik: 1 s/d 13), kurva dinamika gradien terletak di bawah garis nol (garis kesetimbangan termal). Dalam rentang waktu tersebut tanda gradien negatif, yang menunjukkan arah fluks termal dari

lingkungan ke dalam hutan mangrove. Antara jam 19.00 hingga jam 05.00 (keesokan harinya), kurva berada di atas garis nol, tanda gradien positif, dan fluks termal mengalir dari dalam hutan mangrove ke lingkungan. Fluks termal kembali berubah arah dari lingkungan ke dalam hutan mangrove setelah jam 05.00. Sekitar jam 19.15 dan jam 05.00, terjadi kesetimbangan termal dan tidak ada aliran fluks termal antara lingkungan dengan ekosistem hutan mangrove.



Gambar-4.1. Contoh grafik fungsi dinamika gradien suhu udara, hutan mangrove berbatasan dengan laut terbuka. Lokasi Teluk Talengen, transek no. 2

Luas bidang dinamika harian gradien iklim mikro diperoleh dengan mengintegalkan (numerik) fungsi dinamika harian gradien (seperti persamaan-4.1) terhadap waktu untuk periode waktu (1 – 25 jam). Batas integrasi adalah perpotongan kurva dengan garis nol. Untuk contoh di atas, diperoleh luas bidang di bawah garis nol sebesar $9.696 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{jam}/\text{m}$, dan di atas garis nol sebesar $3.140 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{jam}/\text{m}$. Satuan luas bidang dinamika gradien iklim mikro adalah satuan gradien dikali satuan waktu (jam). Untuk kelembaban, satuan luas bidang dinamika gradien adalah $\% \cdot \text{jam}/\text{m}$ dan untuk kuat penerangan radiasi matahari adalah $\text{lux}\cdot\text{jam}/\text{m}$. Untuk gradien suhu udara (contoh Gambar-4.1.), grafik di bawah garis nol menunjukkan arah aliran fluks termal dari lingkungan ke dalam hutan mangrove, yang terjadi pada siang hari hingga sekitar jam 19.00. Grafik di atas garis nol menunjukkan aliran fluks termal dari hutan mangrove ke lingkungan, yang terjadi pada malam hingga menjelang pagi hari. Luas bidang dinamika harian gradien suhu udara di bawah garis kesetimbangan termal dapat dinyatakan sebagai luas bidang dinamika gradien suhu udara siang hari,

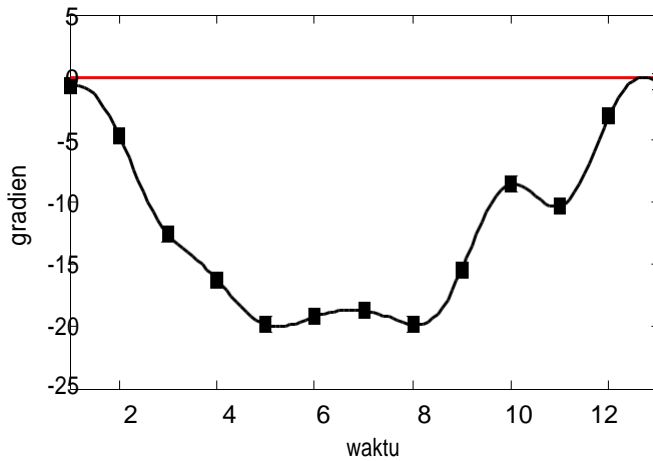
sedangkan luas bidang di atas garis kesetimbangan termal dapat dinyatakan sebagai luas bidang dinamika gradien malam hari.

Indeks dinamika harian gradien iklim mikro adalah luas bidang dinamika gradien malam hari dibagi luas bidang dinamika gradien siang hari. Untuk contoh di atas, koefisien dinamika harian gradien suhu udara adalah 0.324. Indeks dinamika gradien iklim mikro tidak memiliki satuan. Besaran indeks dinamika gradien kecil satu, menunjukkan luas bidang dinamika gradien siang hari lebih besar dibanding malam hari. Secara fisis, indeks dinamika berasosiasi dengan proporsi energi termal tersimpan dalam ekosistem terhadap energi termal yang diterima ekosistem dari lingkungan.

Hasil analisis luas bidang dan koefisien dinamika harian gradien iklim mikro pada sepuluh transek penelitian iklim mikro hutan mangrove yang dilakukan penulis adalah sebagai berikut. Untuk variabel kuat penerangan, luas bidang dinamika gradien bervariasi antara 143.5 hingga 169.9 lux.jam/m. Untuk variabel kuat penerangan hanya ada luas bidang dinamika gradien yakni di siang hari. Gambar-4.2. menunjukkan contoh grafik dinamika gradien kuat penerangan. Kurva gradien berada di bawah garis nol, menunjukkan bahwa kuat penerangan di lingkungan (laut terbuka) lebih tinggi dari kuat penerangan dalam hutan mangrove.

Analisis variasi luas bidang dinamika gradien kuat penerangan antar transek menunjukkan bahwa hutan mangrove yang lebat dan berbatasan dengan laut terbuka memiliki luas bidang yang lebih besar dibanding hutan mangrove yang kanopinya kurang rapat dan berbatasan dengan pantai yang ditumbuhi belukar atau pepohonan. Hal ini membuktikan bahwa kuat penerangan dari tepi ke dalam hutan mangrove yang berbatasan dengan pantai bervegetasi lebih rendah dibanding kuat penerangan pada hutan mangrove yang berbatasan dengan laut terbuka.

Luas bidang dinamika gradien suhu udara siang hari untuk sepuluh transek penelitian bervariasi antara 7,305 hingga 9,967 °C.jam/m, sedangkan malam hari bervariasi antara 2,51 hingga 3,172 °C.jam/m. Indeks dinamika gradien suhu udara bervariasi antara 0,308 hingga 0,375.

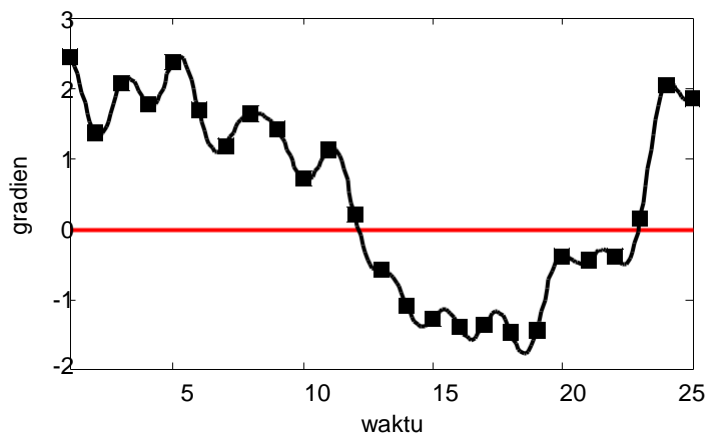


Gambar-4.2. Contoh grafik dinamika gradien kuat penerangan matahari antara jam 06.00 hingga jam 18.00. Lokasi Teluk Talengen, transek no. 2. Luas bidang dinamika gradien 20.03

Hutan mangrove dengan tutupan kanopi tinggi dan berbatasan dengan laut memperlihatkan luas bidang dinamika gradien suhu udara lebih tinggi daripada hutan mangrove dengan tutupan kanopi rendah dan berbatasan dengan pantai. Pada malam hari, hutan mangrove dengan tutupan kanopi tinggi dan berbatasan dengan laut terbuka, juga cenderung memperlihatkan luas bidang dinamika gradien suhu udara yang lebih besar dibanding hutan mangrove yang berbatasan dengan pantai. Hasil penelitian ini dapat dipahami bahwa pada siang hari, hutan mangrove yang berbatasan dengan laut memperoleh pasokan energi termal yang besar dari lingkungan (laut terbuka). Pasokan termal ini terutama melalui penyinaran matahari dan difusi termal arah horizontal dari lingkungan ke dalam hutan mangrove. Tutupan kanopi yang rapat, menyebabkan hutan mangrove ini dapat menyimpan energi termal lebih besar daripada hutan yang tutupan kanopinya renggang. Akibatnya, pada malam hari ketika matahari terbenam dan energi termal di udara terbuka berkurang drastis, maka perbedaan suhu udara di dalam dengan di luar hutan mangrove yang kanopinya rapat, lebih tinggi pada hutan mangrove yang tutupan kanopinya jarang. Tutupan kanopi yang rapat juga menyebabkan pelepasan energi termal malam hari ke lingkungan lebih lambat dibanding di hutan yang tutupan kanopinya lebih rendah. Pelepasan energi termal lambat, maka penurunan gradien juga lebih lambat, sehingga luas bidang dinamika harian gradien suhu udara lebih besar dibanding mangrove yang tutupan kanopinya rendah dan berbatasan dengan pantai.

Variasi koefisien dinamika harian gradien suhu udara antar transek relatif kecil, karena hutan mangrove yang memperlihatkan luas bidang dinamika gradien lebih besar pada siang hari, juga cenderung menunjukkan luas bidang dinamika gradien yang besar pada malam hari. Jika saat ini hutan mangrove dalam

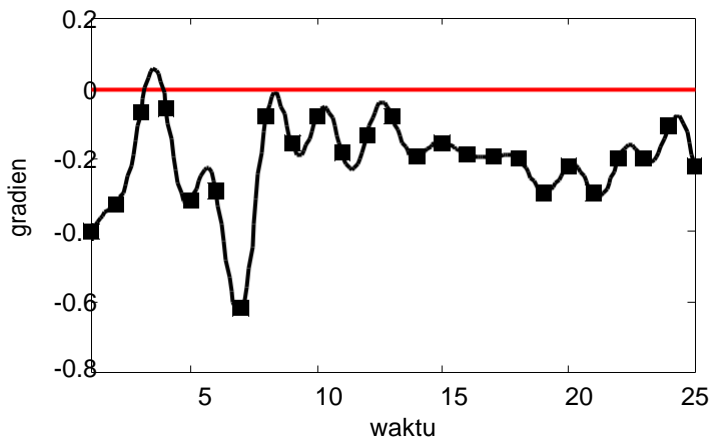
keadaan normal atau berada dalam kapasitasnya menampung energi termal dari lingkungan, maka indeks dinamika ini menjadi acuan untuk mengevaluasi perubahan ekosistem karena pengaruh ekstrim lingkungan, Misalnya, jika terjadi peningkatan pemanasan daerah sekitar tepi hutan dan ekosistem hutan dapat menampung pasokan energi dari luar, maka besarnya indeks dinamika gradien relatif tetap, walaupun luas bidang dinamika gradien bertambah. Jika terjadi peningkatan energi termal di lingkungan dan harga indeks dinamika gradien turun, dapat diduga bahwa ekosistem hutan telah berada dalam batas kemampuan menampung energi dari luar. Jika peningkatan energi termal di lingkungan sekitar bertambah terus maka terdapat kemungkinan terjadinya peningkatan indeks dinamika secara mendadak, karena luas bidang dinamika gradien siang hari (saat terjadi pasokan energi dari lingkungan) akan menurun (gradien tepi menurun karena fungsi hutan mengendalikan energi termal sudah menurun). Fenomena fisis seperti ini dapat diamati pada hutan yang mengalami kekeringan karena pengaruh letusan gunung berapi. Indeks dinamika harian gradien tepi ini potensial dikembangkan untuk pemantauan dampak pemanasan global terhadap ekosistem hutan. Dibutuhkan penelitian lebih lanjut tentang penerapan indeks dinamika harian gradien iklim mikro sebagai parameter iklim mikro hutan.



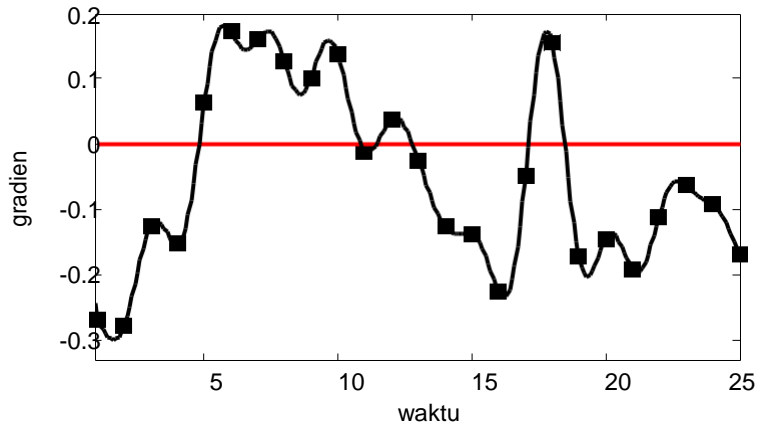
Gambar-4.3. Grafik dinamika harian gradien kelembaban udara, lokasi Teluk Talengen, no transek: 2. Luas bidang dinamika gradien siang hari 20.013 %jam/m, malam hari 10.028. Indeks dinamika gradien 0.501

Grafik dinamika gradien kelembaban udara menunjukkan pola yang terbalik dengan grafik dinamika suhu udara. Gambar-4.3. menunjukkan kurva gradien terletak di atas garis kesetimbangan termal, yang berarti gradien memiliki tanda positif. Pada siang hari, energi termal di luar hutan lebih tinggi sehingga kelembaban udara di lingkungan lebih rendah daripada dalam hutan. Gambar-

4.3. juga menunjukkan bahwa pada malam hari gradien memiliki tanda negatif berarti kelembaban udara di luar lebih tinggi dari dalam hutan. Luas bidang dinamika gradien kelembaban udara siang hari untuk sepuluh transek penelitian bervariasi antara 15,50 hingga 20,36 $\%$.jam/m, sedangkan malam hari bervariasi antara 8,069 hingga 10,03 $\%$.jam/m. Indeks dinamika gradien suhu udara bervariasi antara 0,392 hingga 0,540. Jika kesepuluh transek dibandingkan, maka dapat disimpulkan bahwa luas bidang dinamika gradien kelembaban siang dan malam hari lebih tinggi pada hutan mangrove yang tutupan kanopinya tinggi dan berbatasan dengan laut, daripada hutan mangrove dengan tutupan kanopinya jarang. Hutan mangrove yang menunjukkan luas bidang gradien suhu udara tinggi juga memperlihatkan luas bidang gradien kelembaban udara yang tinggi. Dapat disimpulkan bahwa luas bidang dinamika gradien suhu udara dan kelembaban udara dapat digunakan sebagai parameter karakterisasi iklim mikro hutan mangrove. Koefisien dinamika harian gradien kelembaban udara menunjukkan kecenderungan yang sama dengan koefisien dinamika gradien suhu udara.



Gambar-4.4. Grafik dinamika gradien suhu tanah/air, lokasi Teluk Talengen, transek no.2. Luas bidang dinamika gradien siang hari 4.903 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{jam}/\text{m}$, alam hari 0.024 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{jam}/\text{m}$. Indeks dinamika gradien 0.005. Pengamatan dimulai jam 07.00 s/d 07.00 keesokan harinya



Gambar-4.5. Grafik dinamika gradien suhu tanah/air, lokasi Ratato tok, transek no.1. Luas bidang dianmika gradient siang hari $3.268^{\circ}\text{C.jam/m}$, malam hari $0.573^{\circ}\text{C.jam/m}$. Indeks dinamika gradient 0.175. Pengamatan dimulai jam 19.00 s/d 19.00 keesokan harinya

Gambar-4.4. dan 4.5 menunjukkan grafik dinamika gradien suhu tanah/air pada dua lokasi yang berbeda. Lokasi pertama di Teluk Talengen, dimana selama pengamatan permukaan tanah tetap tertutup air laut, bervariasi antara 0,15 meter hingga 1,4 meter. Lokasi kedua di desa Ratatotok Timur, yang hanya tergenang air antara jam 19.00 hingga jam 20.30 dan antara jam 06.30 sampai jam 07.45. Tinggi genangan air hanya 10 – 15 cm. Pola grafik dinamika gradien suhu tanah/air pada kedua lokasi berbeda dan tidak mengikuti pola perubahan penyinaran matahari. Hal ini berbeda dengan dinamika gradien suhu udara dan kelembaban udara. Untuk variabel suhu dan kelembaban udara, pola dinamika gradien harian sama untuk semua transek, berbentuk periodik sinusoidal dengan periode 24 jam. Grafik dinamika gradien suhu tanah/air menunjukkan bahwa konduksi energi termal tanah dan air tidak hanya dipengaruhi oleh penyinaran matahari, tapi oleh faktor lain seperti pergerakan massa air laut dan masuknya air segar dari daratan dengan kandungan energi termal berbeda, dll. Dinamika harian gradien suhu tanah menunjukkan bentuk yang kompleks, namun grafik dinamika gradien suhu tanah/air yang disajikan pada Gambar-4.4. dan 4.5. merupakan karakteristik habitat tepi mangrove kedua lokasi pengukuran. Penggunaan parameter luas bidang dan indeks dinamika harian gradien iklim mikro perlu diteliti lebih lanjut, antara lain dengan melakukan pengukuran kembali pada kondisi air laut yang berbeda. Hasil analisis dan luaran luas bidang dan koefisien dinamika harian gradien suhu tanah/udara pada sepuluh transek menjadi acuan untuk pengukuran pada lokasi yang sama dengan kondisi air laut berbeda.

Tugas pengembangan (berkelompok)

1. Jelaskan proses difusi termal antara lingkungan dengan ekosistem hutan berdasarkan gradient tepi variable suhu udara dan kelembaban udara
2. Banyak peneliti mengemukakan bahwa habitat tepi kaya akan keragaman species biota. Apa sebab demikian ?. Jelaskan rangkaian pengaruh penyinaran terhadap perubahan energy termal ketersediaan nutrisi dll yang terjadi pada habitat tepi
3. Jelaskan secara fisis, manakah yang lebih jauh penetrasi suhu udara pada hutan yang kerapatan kanopinya tinggi dengan hutan yang kerapatan kanopinya rendah?
4. Ada peneliti yang menyatakan bahwa penetrasi efek tepi akan berkurang jika hutan lebih lebar. Jelaskan secara fisis
5. Apakah tutupan kanopi hutan berpengaruh pada gradient suhu udara di tepi hutan?
6. Berikan penjelasan secara fisis tentang hasil penelitian yang menunjukkan bahwa time-lag antara kuat penerangan matahari dengan suhu udara, semakin besar dengan bertambahnya jarak dari tepi ke tengah hutan.
7. Jelaskan secara komparatif kondisi ekosistem hutan dan lingkungan berbatasan untuk dua area hutan dimana:
 - a. Hutan A, menunjukkan luas bidang dinamika gradient tepi suhu udara lebih tinggi dari hutan B, siang maupun malam hari
 - b. Pada siang hari, bidang dinamika gradient tepi kelembaban udara hutan A lebih tinggi dari B, tapi pada malam hari luas bidang dinamika gradient kelembaban udara kedua area hutan, sama.

5. FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI PARAMETER IKLIM MIKRO



5.1. Faktor-Faktor yang mempengaruhi parameter iklim mikro dalam hutan

Untuk mengkarakterisasi iklim mikro hutan, penting sekali mempertimbangkan faktor-faktor yang mempengaruhi parameter iklim mikro. Pertimbangan penetapan transek dan posisi pengukuran, waktu dan interval waktu pengukuran, pengontrolan bias variable iklim mikro yang hendak diukur hingga interpretasi luaran penelitian, membutuhkan pemahaman tentang faktor-faktor yang berpengaruh di lapangan. Semakin banyak faktor yang mempengaruhi pengukuran variable iklim mikro, semakin kompleks analisis yang harus dilakukan untuk mendapatkan luaran yang valid.

Iklim mikro hutan dipengaruhi faktor atmosfer dan kondisi ekosistem hutan, serta lingkungan berbatasan. Faktor atmosfer yang mempengaruhi iklim mikro hutan adalah penyinaran matahari, curah hujan, suhu udara, kelembaban udara dan kecepatan angin. Kondisi ekosistem hutan dan lingkungan yang mempengaruhi iklim mikro adalah: bentang alam dan penggunaan lahan lingkungan sekitar, ukuran fragmen hutan (Moore *et al.*, 2005), adanya matriks dan bentuk/tipe matriks (tambalan) (Pinto *et al.*, 2010), dan struktur kanopi (adanya celah, tingkatutupan kanopi, tinggi pohon) (Mohamed *et al.*, 2009). Faktor atmosfer, dan kondisi ekosistem hutan - lingkungan bersifat interaktif mempengaruhi difusi energi (cahaya dan termal) yang terukur dalam parameter iklim mikro.

Faktor atmosfer pada dasarnya adalah faktor yang tidak dapat dikendalikan, dan justru harus dievaluasi pengaruhnya terhadap perubahan spasial maupun temporal (harian, bulanan, tahunan) iklim mikro. Pengaruh variasi kondisi atmosfer menyebabkan variasi iklim mikro pada satu area atau transek atau pada satu posisi dalam transek. Luaran penelitian parameter iklim mikro bukan sebuah harga eksak tapi suatu rentang besaran yang variasinya bergantung pada faktor-faktor yang mempengaruhi penelitian iklim mikro di lapangan. Penelitian pengaruh faktor atmosfer dapat dilakukan dengan cara mengukur atau mengambil data pada kondisi atmosfer berbeda. Misalnya, untuk mengukur pengaruh kecepatan angin terhadap iklim mikro hutan, perlu dilakukan pengukuran pada kondisi kecepatan angin tinggi dan rendah, masing-masing dengan arah angin: dari tepi ke tengah hutan, dari hutan ke tepi dan sejajar tepi hutan. Prinsip dasar penelitian pengaruh faktor atmosfer terhadap variasi iklim mikro hutan adalah sebagai berikut:

- a) Faktor penyinaran matahari, dalam hal ini adalah ukuran kuantitas energi yang diterima ekosistem hutan dan lingkungan berbatasan. Faktor penyinaran ini mempengaruhi variable: suhu udara, kelembaban udara, suhu tanah, kelembaban tanah (Gehlhausen *et al.*, 2000; Moore *et al.*, 2005; Wolanski, 2008). Intensitas cahaya atau kuat penerangan matahari yang diterima permukaan tanah di bawah kanopi, merupakan interaksi antara faktor atmosfer tutupan awan dengan kondisi kondisi ekosistem yakni topografi, orientasi tepi (posisi terhadap lintasan matahari), struktur danutupan kanopi. Untuk meneliti pengaruh tutupan awan, pengambilan data atau pengukuran variable iklim mikro dilakukan pada kondisi cuaca cerah dan tutupan awan

tebal. Perubahan tutupan awan sepanjang hari juga perlu dikontrol dengan mencatat prosentase tutupan awan.

- b) Faktor curah hujan. Curah hujan mempengaruhi variabel iklim mikro: suhu udara, kelembaban udara, suhu tanah, kelembaban tanah (McCaughey *et al.*, 1997; Chen *et al.*, 1999; Spittlehouse, *et al.*, 2004; Mazda and Kamiyama, 2007; Pohlman *et al.*, 2009). Untuk meneliti pengaruh curah hujan, pengukuran atau pengambilan data perlu dilakukan pada musim kemarau dan musim hujan. Jika dibutuhkan, intensitas curah hujan selama pengambilan data harian diukur bersamaan dengan pengukuran variabel iklim mikro.
- c) Suhu udara dan kelembaban udara regional merupakan faktor atmosfer. Di dalam hutan, suhu dan kelembaban udara mengalami perubahan karena faktor ekologis hutan, sehingga menjadi variabel iklim mikro hutan (Brosfokske *et al.*, 1997; Davies-Colley *et al.*, 2000; Spittlehouse *et al.*, 2004). Data suhu udara dan kelembaban udara regional dapat menggunakan data suhu udara dan kelembaban udara dari BMG atau melakukan pengukuran di tempat terbuka, yang diasumsikan tidak dipengaruhi kondisi ekosistem hutan.
- d) Arah dan kecepatan angin. Dalam penelitian iklim mikro, arah dan kecepatan angin global atau regional merupakan faktor atmosfer. Fitur ekologis hutan mengubah kecepatan dan arah angin dalam hutan, sehingga kecepatan dan arah angin dalam hutan merupakan variabel iklim mikro (Davies_Colley *et al.*, 2000; Spittlehouse *et al.*, 2004). Angin mempengaruhi variabel iklim mikro lainnya yakni suhu udara, kelembaban udara (Chen *et al.*, 1995; DeSiqueiran *et al.*, 2004), suhu tanah dan kelembaban tanah (Spittlehouse *et al.*, 2004; Wolanski, 2008). Davies Colley *et al.* (2000) mengemukakan bahwa gradient iklim mikro bervariasi bergantung pada kecepatan dan arah angin. Spittlehouse *et al.* (2004) mengemukakan bahwa tiupan angin ke arah dalam hutan menyebabkan penetrasi iklim mikro bertambah lebih jauh dibandingkan tanpa angin atau jika angin bertiup ke arah lain. Angin yang mengarah ke dalam hutan menyebabkan penetrasi suhu udara lebih jauh sekitar tiga kali tinggi pohon (Chen *et al.* 1995). Penelitian pengaruh angin terhadap iklim mikro dapat dilakukandengan cara mengukur variabel iklim mikro pada kondisi kecepatan angin dan arah angin bervariasi, kemudian membuat pemodelan perubahan temporal dan spasial, membandingkan besaran dan pola perubahan parameter iklim mikro pada kondisi angin berbeda.

Banyaknya variasi pengukuran yang dilakukan bergantung pada tujuan atau rancangan penelitian, kebutuhan luaran data/informasi, ketersediaan dana dan waktu penelitian. Penelitian pada kondisi atmosfer tertentu, dijadikan acuan untuk penelitian di tempat yang sama dalam kondisi atmosfer berbeda.

Faktor kondisi ekosistem hutan dan lingkungan berbatasan yang dipertimbangkan dalam perencanaan pengambilan data ialah:

5.1.1. Bentang alam dan penggunaan lahan lingkungan berbatasan dengan hutan
Bentang alam dan penggunaan lahan berbatasan, sangat kuat mempengaruhi iklim mikro area sekitar tepi hutan. Besarnya pengaruh lingkungan ini bergantung pada besarnya transmisi energi cahaya dan emisi termal oleh

komponen-komponen system lingkungan (Godefroid *et al.*, 2006). Emisi termal meliputi energi termal hasil absorpsi energi cahaya dan emisi termal oleh aktivitas di lingkungan seperti emisi termal kendaraan bermotor, aktivitas di lingkungan perumahan dll. Lingkungan berbatasan yang ditumbuhi belukar dengan pepohonan akan menyebabkan fluktuasi iklim mikro yang berbeda dalam ekosistem hutan, karena perbedaan dalam kapasitas absorpsi energi cahaya dan emisi energi termal (Hennenberg *et al.*, 2008). Arah fluks termal dalam hutan yang berbatasan dengan area pemukiman padat berlangsung tetap sepanjang hari dari lingkungan ke dalam hutan (Kompeneers, 1978, dalam Godefroid and Koedam, 2003); hal ini berbeda dengan yang terjadi dalam hutan berbatasan dengan lahan terbuka. Di hutan berbatasan dengan lahan terbuka, arah fluks termal siang hari dari lingkungan ke dalam hutan, sedangkan pada malam hari dari hutan ke lingkungan (Davies- Chen *et al.*, 1995; Brosofske *et al.*, 1997; Colley *et al.*, 2000; Spittlehouse *et al.*, 2004)

Kuantitas energi termal akibat penyinaran bergantung pada ukuran atau luas bentang alam lingkungan berbatasan. Didham dan Lawton (1999) mengemukakan bahwa penetrasi kebanyakan iklim mikro ke dalam hutan yang tepinya terbuka, bervariasi dua hingga lima kali lebih jauh daripada hutan yang tepinya tertutup. Ukuran luas area terbuka yang berbatasan dengan hutan menentukan kecepatan angin (Raynor, 1971; Chen *et al.*, 1995; Davies-Colley *et al.*, 2000) dan selanjutnya kecepatan angin mempengaruhi penetrasi variabel iklim mikro lainnya. Ukuran koridor dalam hutan, menentukan pengaruh penyinaran dan perubahan energi termal yang mempengaruhi difusivitas spesies biota (Orrock and Danielson, 2005)

5.1.2. Struktur hutan dan kondisi lingkungan berbatasan

Struktur hutan dari tepi ke tengah hutan sangat menentukan besaran dan variasi harian parameter iklim mikro hutan. Struktur hutan berkaitan dengan ukuran (luas) fragmen hutan, bentuk dan jarak antar tambalan, usia fragmen hutan dan tambalan berdampingan, keragaman jenis vegetasi (Game, 1980; Blouin and Connor, 1985; Pinto *et al.*, 2010). Menurut Game (1980), tepi tambalan berbentuk lurus dan panjang lebih efektif dalam mempertahankan kekayaan spesies dibanding tepi bundar.

Pengaruh lebar hutan antara lain dikemukakan dalam penelitian Ledwith (1996) yang dikutip Moore *et al.* (2005), bahwa semakin bertambah lebar fragmen, semakin berkurang fluktuasi suhu udara, sedangkan kelembaban relatif dalam hutan makin meningkat. Hagan and Whitman, (2000), mengemukakan bahwa bertambah lebar hutan penyangga, perbedaan suhu udara di dalam hutan dengan di tepi makin besar. Ini berarti semakin lebar hutan penurunan suhu udara semakin besar. De Siqueiran *et al.* (2004), mengemukakan bahwa fragmen hutan berukuran lebih dari 10 ha dapat menstabilkan suhu tanah, suhu udara, dan kelembaban udara pada jarak lebih dari 90–120 m. Pada fragmen

hutan yang ukurannya kurang dari 10 ha jarak penetrasi iklim mikro menjadi lebih jauh.

Adanya tambalan berdekatan mempengaruhi penetrasi efek tepi (Fletcher, 2005; Pinto *et al.*, 2010) dan perubahan parameter variable iklim mikro lainnya (Chen *et al.*, 2009). Adanya koridor dalam tambalan mempengaruhi difusivitas species biota (Orrock and Danielson, 2005); hal ini dapat diduga karena pengaruh penyinaran dan perubahan kondisi termal yang mempengaruhi nutrisi dan aktivitas biota. Jika demikian, adanya koridor menyebabkan efek tepi yang baru, walaupun dalam skala yang kecil. Struktur fragmen hutan yang terdiri dari beberapa tambalan berdekatan, mempengaruhi difusi energi cahaya dan energi termal, sehingga mempengaruhi besaran parameter iklim mikro. Semakin banyak tambalan atau tepi berdekatan, menyebabkan semakin jauh efek tepi iklim mikro (Fletcher, 2005). Pola spasial vegetasi dari tepi ke dalam hutan sangat kuat mengontrol perubahan gradient iklim mikro (Breshears *et al.*, 2009; Duniway *et al.*, 2010 dan Asbjornsen *et al.*, 2011).

Usia fragmen hutan berkaitan dengan kerapatan pohon dan tinggi tegakan. Perbedaan tinggi tegakan menyebabkan perbedaan pengaruh bayangan terhadap perubahan harian parameter iklim mikro. Spittlehouse *et al.* (2004) mengemukakan bahwa tinggi pohon mempengaruhi kedalaman efek tepi. Chen *et al.* (1999), Godefroid *et al.*, (2006), mengemukakan bahwa kedalaman efek tepi dapat mencapai empat hingga enam kali ketinggian pohon dari tepi yang terbuka. Moore *et al.* (2005) mengutip Hewlett and Fortson (1982) dan Hennenberg *et al.* (2008), mengemukakan bahwa pengaruh bayangan yang disebabkan oleh belukar kurang efektif dibandingkan dengan pohon yang lebih tinggi dalam mengendalikan suhu air sungai di Georgia Piedmont. Kerapatan vegetasi sangat menentukan aliran energi antara lingkungan dengan ekosistem hutan, sehingga perubahan iklim mikro ditentukan oleh ketajaman perubahan komposisi dan kerapatan vegetasi (Chen *et al.*, 1999).

Struktur hutan yang homogen dengan tak homogen memberikan pengaruh yang berbeda terhadap perubahan iklim mikro harian. Hutan yang homogen terdiri dari pepohonan yang tinggi, memberikan pengaruh berbeda pada iklim mikro dibanding belukar (Hennenberg *et al.*, 2008). Perombakan hutan atau kerusakan hutan karena faktor alam menjadi kajian menarik karena kerusakan atau perubahan struktur diikuti perubahan iklim mikro secara ekstrim, dan akan berdampak negatif pada keragaman hayati Tamatamah (2007). Keller (2005) mengemukakan bahwa pembabatan hutan menyebabkan perubahan jangka pendek dan jangka panjang iklim mikro hutan, erosi dan dan kompaksi tanah serta merusak siklus nutrisi. Perubahan ini dapat mempengaruhi pertumbuhan species tumbuhan dan dalam jangka panjang mengubah komposisi species pohon dan diversitas hewan dalam hutan. Dalam penelitian iklim mikro hutan, area yang mengalami perubahan struktur hutan karena faktor alam maupun

manusia, perlu diteliti, untuk mendapatkan data/informasi pembandingan terhadap penelitian atau karakterisasi iklim mikro hutan.

Struktur hutan (lebar fragmen hutan, adanya tambalan (jarak, ukuran, usia, bentuk tepi berbatasan), struktur vertical dan horizontal kanopi (arah tepi – tengah hutan) dan kondisi lingkungan berbatasan menjadi pertimbangan utama dalam penetapan transek pengukuran. Pilihan transek pengukuran disesuaikan dengan tujuan penelitian dan kondisi lapangan yang hendak diinformasikan dari hasil penelitian. Penetapan transek hendaknya didahului pengamatan awal tentang faktor-faktor ekologis yang berpengaruh signifikan pada variable iklim mikro, analisis situasi dan jika dibutuhkan dilakukan simulasi. Faktor dan bentuk pengaruhnya pada variable iklim mikro dianalisis berdasarkan kontribusinya pada absorpsi energi cahaya, perubahan energi cahaya menjadi energi termal, emisi radiasi termal dan difusi/konduksi termal). Prosedur ini dapat mengurangi bias penelitian atau kegagalan pengukuran karena kondisi ekstrim dari faktor- faktor tersebut.

5.1.3. Kanopi Hutan

Kanopi hutan mengendalikan pengaruh atmosfer seperti curah hujan, angin dan kelembaban udara dan menciptakan iklim mikro dalam hutan. Tutupan kanopi mempengaruhi semua variable iklim mikro, karena menentukan transmisi dan difusi energi cahaya (Black *et al.*, 1991; Canham *et al.*, 1999. Penetrasi dan difusi radiasi cahaya mengubah energi termal dalam ekosistem hutan, sehingga terjadi difusi termal yang menyebabkan perubahan variable iklim mikro (Godefroid *et al.*, 2006). Peran interaktif kanopi hutan dan faktor atmosfer dalam mempengaruhi iklim mikro adalah: kanopi hutan mengurangi penetrasi radiasi matahari (Malanson and Carins 1995; Spittlehouse, 2004; Latief and Blackburn (2010)), mengurangi presipitasi yang masuk ke bawah kanopi, mengurangi peningkatan suhu udara (Young and Mitchell, 1994; Chen *et al.*, 1995; Cadenasso *et al.*, 1997; Davies-Colley *et al.*, 2000; Spittlehouse *et al.*, 2004; Alongi and de Carvalho, 2008; Mohamed *et al.*, 2009), mengurangi kecepatan angin (Chen *et al.*, 1995; Davies-Colley *et al.*, 2000; Spittlehouse *et al.*, 2004), mempertahankan kelembaban udara (Chen *et al.*, 1995; Broszofski *et al.*, 1997; Davies-Colley *et al.*, 2000; Spittlehouse *et al.*, 2004; Wolanski, 2008; Latief and Blackburn (2010), mengurangi peningkatan suhu tanah (De Siqueiran *et al.*, 2004; Feng *et al.*, 2006), mempertahankan kelembaban tanah (De Siqueiran *et al.*, 2004; Asbjornsen *et al.*, 2004))

Beberapa hasil penelitian yang secara khusus menjelaskan pengaruh kanopi terhadap iklim mikro dan besaran parameter iklim mikro adalah sebagai berikut. Mohamed *et al.* (2009) berdasarkan hasil penelitiannya menyimpulkan: semakin terbukanya celah kanopi, akan terjadi peningkatan cahaya dan suhu, peningkatan laju evaporasi dan transpirasi, yang akan mempengaruhi pertumbuhan pohon. Mohamed *et al.* (2009) dan Latief and Blackburn (2010)

mengemukakan: perubahan celah kanopi memberi pengaruh sistematis terhadap perubahan harian kuat penerangan matahari, suhu udara, suhu tanah, kelembaban relatif, namun tidak mempengaruhi kandungan air dalam tanah. Hasil penelitian Canham *et al.* (1990), Matlack (1993), Chen *et al.* (1995) dan Godefroid *et al.* (2006) menyimpulkan bahwa distribusi daun pada arah vertical mempengaruhi penetrasi cahaya dan gerakan udara dan dengan demikian mempengaruhi gradient suhu dan kelembaban.

Berdasarkan hasil penelitian, maka dapat disimpulkan bahwa variable iklim mikro yang signifikan dipengaruhi oleh tutupan kanopi adalah: intensitas cahaya atau kuat penerangan matahari, kecepatan angin, suhu udara, kelembaban udara, suhu tanah, kelembaban tanah. Parameter iklim mikro yang potensial menunjukkan perbedaan temporal (harian) dan spasial iklim mikro karena pengaruh kanopi adalah: beda besaran iklim mikro di dalam hutan – di tepi – di luar hutan atau pada tambalan berdampingan, beda besaran iklim mikro malam dan siang hari (kecuali variable kuat penerangan), kedalaman efek tepi, gradient di tepi, time lag variable iklim mikro dengan penyinaran, (dan variable yang dikembangkan yakni: luas bidang dan indeks dinamika harian gradient iklim mikro). Penetapan transek dan posisi pengukuran perlu mempertimbangkan kondisi tutupan vegetasi, sesuai tujuan dan rancangan penelitian. Untuk mengevaluasi pengaruh kanopi terhadap perubahan spasial dan temporal variable iklim mikro perlu dilakukan pengukuran tutupan kanopi (*canopy cover*) atau kerapatan kanopi (*canopy density*) atau keterbukaan kanopi (*canopy exposure*) sepanjang transek atau pada posisi pengukuran.

5.1.4. Kondisi topografi dan kemiringan permukaan lahan

Kondisi topografi dan orientasi permukaan lahan terhadap lintasan matahari mempengaruhi intensitas penyinaran. Perubahan intensitas penyinaran mempengaruhi perubahan energi panas dalam hutan dan lingkungan (Camargo and Kapos, 1995; Chen *et al.*, 1995). Pengaruh topografi dan kemiringan (orientasi permukaan) terhadap penyinaran matahari dan perubahan panas sepanjang hari, secara fisis potensial menyebabkan fluktuasi harian iklim mikro. Fluktuasi penyinaran diakibatkan oleh permukaan yang tidak merata, potensial meningkatkan variasi spasial dan temporal iklim mikro. Permukaan yang tidak merata menerima energi radiasi matahari dengan kuantitas berbeda, dan secara temporal berfluktuasi tinggi karena posisi permukaan terhadap perubahan arah sinar matahari. Permukaan yang menghadap arah sinar datang menerima energi cahaya lebih besar dibanding permukaan yang membelakangi arah sinar datang. Perbedaan energi cahaya yang diterima permukaan menyebabkan perbedaan energi yang diemisikan, dan menyebabkan fluktuasi fluks termal dalam

ekosistem hutan. Iklim mikro dalam hutan dengan topografi bergelombang secara teoritik lebih berfluktuasi dibanding dalam hutan dengan topografi datar. Penelitian untuk mengevaluasi pengaruh topografi dan kelerengan terhadap perubahan temporal dan spasial iklim mikro dapat dilakukan dengan memilih transek yang mewakili berbagai variasi kemiringan dan arah kemiringan terhadap lintasan matahari.

5.2. Faktor-Faktor yang mempengaruhi parameter iklim mikro hutan mangrove

Ekosistem hutan mangrove dan lingkungan berbatasan agak berbeda dengan ekosistem hutan di daratan. Kendati demikian, proses fisis yang meliputi penyinaran, absorpsi energy cahaya, emisi energy termal dan difusi termal dalam ekosistem dan antara ekosistem dengan lingkungan, sama. Seperti halnya hutan di daratan, faktor-faktor yang mempengaruhi parameter iklim mikro hutan mangrove meliputi factor atmosfer, dan kondisi ekosistem dan lingkungan berbatasan. Menurut Mazda and Wolanski (2009), hutan mangrove dipengaruhi oleh: (1) perubahan musim (hujan dan kering), (2) variasi arah dan kecepatan angin (Ridd *et al.*, 1988), (3) perubahan suhu air yang pengaruhnya masuk melalui pasut, (4) perubahan tekanan atmosfer, (5) perubahan karena peningkatan debit air sungai akibat hujan (Kjerfve, 1990). Pengaruh faktor atmosfer (penyinaran matahari, curah hujan, suhu udara, kelembaban udara dan kecepatan angin) terhadap perubahan temporal dan variasi spasial iklim mikro dalam hutan mangrove pada dasarnya sama dengan hutan di daratan. Pertimbangan untuk mengevaluasi pengaruh factor atmosfer terhadap variasi parameter iklim mikro hutan mangrove, sama dengan yang dilakukan dalam hutan di daratan.

Lingkungan hutan mangrove lebih bervariasi daripada lingkungan hutan di daratan. Tepi hutan mangrove dapat berupa batas hutan mangrove dengan laut, hutan mangrove dengan pantai terbuka, hutan mangrove dengan pantai ditumbuhi belukar atau pepohonan, hutan mangrove dengan muara sungai, hutan mangrove dengan pemukiman dll. Dibanding hutan di daratan, lingkungan hutan mangrove lebih bervariasi dalam hal penerimaan energi matahari, kapasitas absorpsi energy cahaya, emisi termal dan konduktivitas/difusi termal. Secara fisis, aliran massa air laut dan sungai dengan kandungan energy termal yang berbeda-beda dan berubah sepanjang hari, berkontribusi perubahan temporal dan variasi spasial iklim mikro dalam hutan mangrove. Kondisi ini potensial menyebabkan iklim mikro hutan mangrove lebih berfluktuasi dibanding iklim mikro hutan di daratan. Pengukuran pada

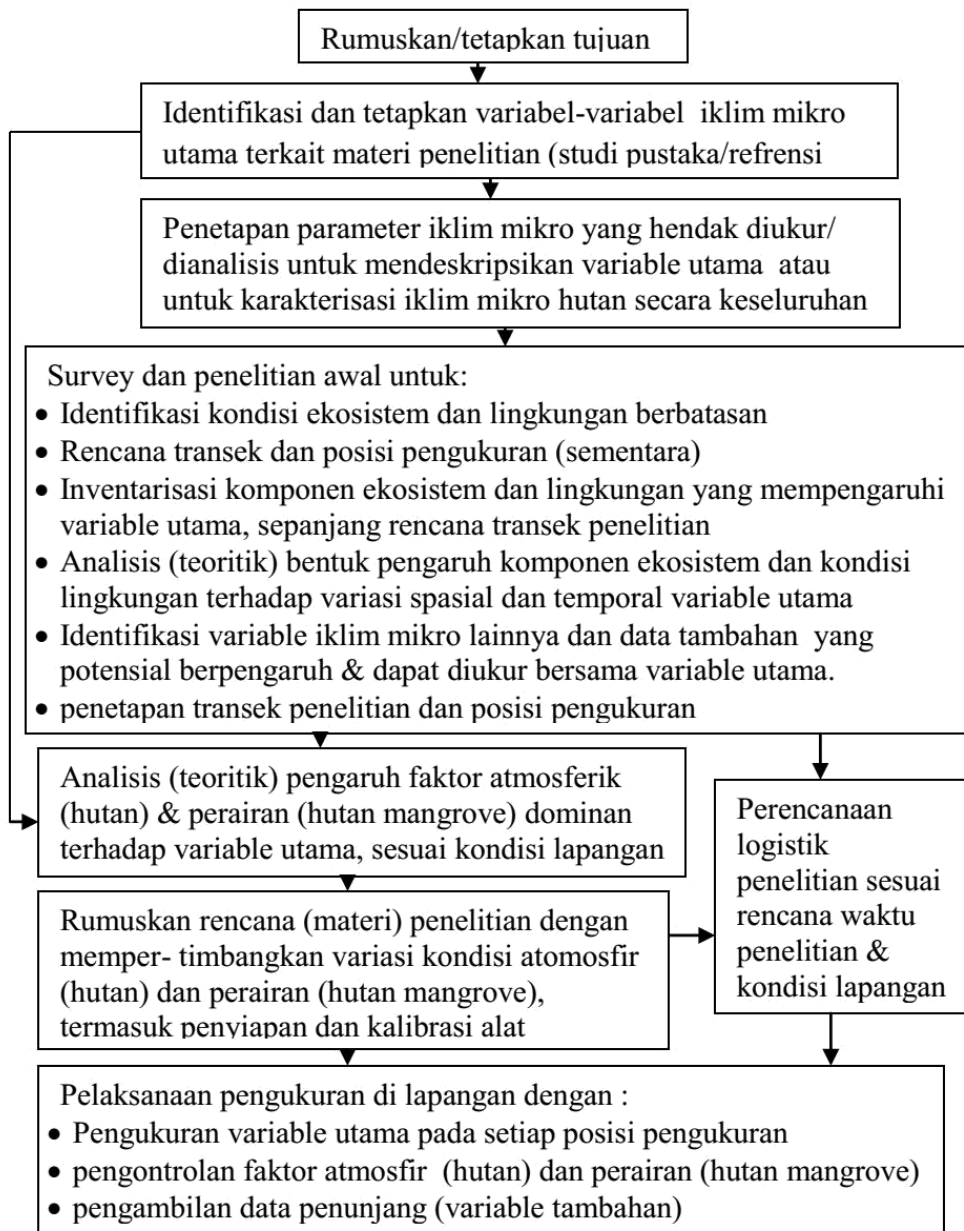
transek memotong batas mangrove dengan lingkungan yang berbeda-beda akan memperkaya karakterisasi iklim mikro hutan mangrove.

Pengaruh struktur pohon mangrove, percabangan, dan keterbukaan kanopi hutan mangrove terhadap penyinaran dan kecepatan angin (Yoko-o and Tokeshi, 2011), secara fisis mempengaruhi perubahan temporal dan variasi spasial variable iklim mikro lainnya. Perubahan struktur kanopi akibat penebangan pohon mangrove meningkatkan suhu tanah sebesar 13 °C, dan suhu udara sebesar 11 °C (Hernandez, 2001). Pengaruh perombakan area hutan mangrove menyebabkan perubahan suhu air. Menurut Hawley (2010), suhu air harian maksimum di kolam terbuka lebih tinggi 7.0–9.0 °C daripada kolam tertutup daripada kolam dalam hutan. Fenomena seperti ini dapat terjadi pada area hutan mangrove yang dirombak jadi tambak. Krauss *et al.*, 2008: mengemukakan bahwa celah yang besar akan lebih panas dibanding celah sempit dalam hutan mangrove, sehingga lebih signifikan mempengaruhi distribusi kepiting. Untuk mengevaluasi pengaruh tutupan kanopi dan daerah terbuka dalam hutan mangrove, transek dapat dipilih memotong tepi yang berbatasan dengan daerah terbuka. Pengukuran variable iklim mikro pada transek ini dapat menghasilkan informasi fluktuasi iklim mikro, gradient dan kedalaman efek tepi iklim mikro untuk dibandingkan dengan transek yang kondisi bentang alam dan tutupan kanopinya berbeda.

Efek penggenangan permukaan tanah dalam hutan mangrove merupakan fenomena khas dalam ekosistem mangrove yang tidak ditemui dalam hutan di daratan. Secara fisis, permukaan lahan oleh air yang mengandung energy termal tertentu dan berubah sepanjang hari akan mempengaruhi difusi termal dan iklim mikro dalam hutan mangrove. Snedaker (1989), Krauss and Allen (2003), dan Lewis (2005) mengemukakan bahwa informasi seperti frekwensi dan lamanya penggenangan permukaan lahan, intrusi air asin sangat dibutuhkan untuk menganalisis pengaruhnya terhadap pertumbuhan hutan mangrove dalam berbagai jenis. Pengaruh factor hidrologis ini pada dasarnya tidak dapat dipisahkan dengan iklim mikro karena interaksi termal antara udara dengan air yang mempengaruhi perubahan suhu udara, kelembaban udara, suhu tanah/air. Interaksi factor ekohidrologi dengan iklim mikro merupakan katakteristik iklim mikro hutan mangrove yang dapat diamati pada masing-masing tipe hutan mangrove: *Overwash, Fringing, Riverine, Basin, Hammock*, dan *Scrub*. Penelitian dan karakterisasi iklim mikro hutan mangrove untuk masing-masing tipe hutan mangrove ini akan menghasilkan data rentang besaran parameter iklim mikro yang dapat dikomparasi antara satu dengan yang lain. Dampak pemanasan global yang diduga dapat menggeser atau mengubah komposisi hutan mangrove (Woodroffe and Grindrod, 1991; Snedaker, 1995; Field 1995;

Ellison 2005), dapat dikaji berdasarkan perubahan parameter iklim mikro masing-masing tipe hutan mangrove. Dalam penetapan transek pengukuran iklim mikro hutan mangrove, pertimbangan pertama sebaiknya didasarkan pada variasi tipe hutan mangrove yang ada di lokasi penelitian, karena secara fisis, masing-masing tipe memiliki karakteristik iklim mikro berbeda. Variasi ekologis masing-masing tipe mangrove ini, mencakup variasi kondisi lingkungan berbatasan. Pertimbangan selanjutnya didasarkan pada adanya tambalan atau area terbuka, kerapatan kanopi dan jenis mangrove dst.

Tahapan umum kegiatan persiapan penelitian hingga pengambilan data di lapangan disajikan pada Gambar-5.1. Tahapan pelaksanaan kegiatan lapangan mengacu pada tujuan penelitian yang telah ditetapkan sebelumnya. Berdasarkan tujuan, peneliti seyogianya melakukan kajian teori/ referensi penelitian untuk menetapkan variable penelitian, hubungan antar variable, metode pengukuran variable secara umum dll. Selanjutnya peneliti menetapkan parameter iklim mikro yang menjadi luaran, sesuai tujuan penelitian. Peneliti perlu melakukan survey awal untuk menganalisis kondisi lapangan berdasarkan teori dan referensi penelitian, hingga menetapkan transek penelitian dan posisi pengukuran untuk dapat mendeskripsikan atau mengkarakterisasi iklim mikro hutan. Berdasarkan hasil survey dilakukan analisis pengaruh factor atmosfer (untuk penelitian di hutan) dan kondisi perairan (untuk penelitian di hutan mangrove). Berdasarkan hasil analisis, peneliti memutuskan apakah pengukuran dilakukan pada satu kondisi tertentu ataukah dilakukan pada kondisi atmosfer dan perairan yang bervariasi. Keputusan tersebut bergantung pada tujuan penelitian, kondisi lapangan, ketersediaan dana, peralatan dan waktu penelitian. Selanjutnya peneliti menyiapkan materi penelitian (format pengamatan, peralatan dan validasinya dll), logistic, penjadwalan pengamatan dll.



Gambar-5.1.Skema tahapan persiapan hingga pengukuran dalam penelitian iklim mikro hutan mangrove.

DAFTAR PUSTAKA

- Aksornkoae, S. 1993. *Ecology and Management of Mangrove*. IUCN, Bangkok, Thailand.
- Alongi, D.M. (1996). The dynamics of benthic nutrient pools and fluxes in tropical mangrove forests. *Journal of Marine Research*, 54 : 123-148
- Alongi D.M. and N.A. De Carvalho. 2008. The effect of small-scale logging on stand characteristics and soil biogeochemistry in mangrove forests of Timor Leste. *Forest Ecology and Management*, 255: 1359-1366
- Anderson P.D., D. J. Larson and S.S. Chan. 2007. Riparian Buffer and Density Management Influences on Microclimate of Young Headwater Forests of Western Oregon. *Forest Science* 53(2): 254 –269.
- Asbjornsen H., M.S. Ashton, D. J. Vogt and S. Palacios, 2004. Effects of habitat fragmentation on the buffering capacity of edge environments in a seasonally dry tropical oak forest ecosystem in Oaxaca, Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 103: 481–495
- Ashton P.M.S. 1992. Some measurements of the microclimate within a Sri Lankan tropical rainforest. *Agric. For. Meteorology*, 59: 217–235.
- Atzet T. and R.H. Waring. 1970. Selective filtering of light by coniferous forests and minimum light energy requirements for regeneration. *Canadian Journal of Botany*, 48: 2136-2167.
- Aussenac G. 2000. Interactions between forest stands and microclimate: ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science* 57: 287–301.
- Baldwin A.H., M.A.F. Egnotovitch and W.J. Platt. 2001. Regeneration in fringe mangrove forests damaged by Hurricane Andrew. *Plant Ecology*, 157: 151–164.
- Ball M.C. and C. Critchley. 1982. Photosynthetic responses to irradiance by the grey mangrove, *Avicennia marina*, grown under different light regimes. *Plant Physiol.* 70: 1101–1106.
- Bann C., 2003 An economic analysis of alternative mangrove management strategies in Koh Kong Province, Cambodia. International Development Research Centre. Ottawa, Canada
- Bengen D.G. 2000. *Sinopsis Ekosistem dan Sumberdaya Alam Pesisir*. Pusat Kajian Sumberdaya Pesisir dan Lautan – Institut Pertanian Bogor. Bogor, Indonesia.
- Benitez-Malvido J. 1998. Impact of forest fragmentation on seedling abundance in a tropical rain forest. *Conserv Biol* 12: 380–389
- Berger U, V.H. Rivera-Monroy, Th.W. Doyle, F. Dahdouh-Guebas, N. C. Duke, M.L. Fontalvo-Herazo , H. Hildenbrandt, N. Koedam, U. Mehlig, C. Piou and R.R. Twilley, 2008. Advances and limitations of individual-based

- models to analyze and predict dynamics of mangrove forests. *Aquatic Botany* 89 : 260–274
- Bjorkman O., B. Demmig and T.J. Andrews. 1988. Mangrove photosynthesis: response to high-irradiance stress. *Aust. J. Plant Physiol.* 15: 43–61.
- Black T.A., J.M. Chen, X. Lee and R.M. Sagar. 1991. Characteristics of shortwave and longwave irradiances under a Douglas-fir forest stand. *Canadian Journal of Forest Research*, 21:1020-1028
- Blouin M.S. and E.F. Connor. 1985. Is there a best shape for nature reserves? *Biological Conservation* 32: 277-288.
- Breshears D.D., O.B. Myers, F.J. Barnes. 2009. Horizontal heterogeneity in the frequency of plant-available water with woodland intercanopy-canopy vegetation patch type rivals that occurring vertically by soil depth. *Ecohydrology* 2: 503–19.
- Broadbent E.N., G.P. Asner, M. Keller, D.E. Knapp, P.J.C. Oliveira. and J.N. Silva. 2008. Forest fragmentation and edge effects from deforestation and selective logging in the Brazilian Amazon. *Biological Conservation*, 141: 1745-1757
- Brosfokske K.D., J.Q. Chen, R.J. Naiman and J.F. Franklin. 1997. Harvesting effects on microclimatic gradients from small streams to uplands in western Washington. *Ecol. Appl.* 7: 1188 –1200.
- Burton O.J. and J.M.J. Travis, 2008. Landscape structure and boundary effects determine the fate of mutations occurring during range expansions. *Heredity* 101: 329–340
- Cadenasso M.L., M.M. Traynor and S.T.A. Pickett, 1997. Functional location of forest edges: Gradients of Multiple Physical Faktors. *Canadian Journal of Forest Research* 27:774-782.
- Cadenasso M. L., and S. T. A. Pickett. 2001. Effect of edge structure on the flux of species into forest interiors. *Conservation Biology* 15:91-97.
- Cadenasso M.L, S.T.A Pickett, K.C. Weathers and C.G.Jones. 2003. A framework for a theory of ecological boundaries. *BioScience* 53:750-758.
- Campbell G. 1977. *An introduction to environmental physics*. Springer Verlag. NY. p. 122 – 124
- Campbell D.J. 1998. Salt-wind induced wave regeneration in coastal pine forests in New Zealand. *Canadian Journal Forest Research* 28: 953–960
- Canham C.D., J.S.Denslow, W.J. Platt, J.R. Runkle, T.A. Spies and P.S. White. 1990. Light regimes beneath closed canopies and treefall gaps in temperate and tropical rainforest. *Canadian Journal of Forest Research* 20: 620– 631.
- Canham C.D., K.D. Coates, P. Bartemucci and S. Quaglia. 1999. Measurement and modeling of spatially explicit variation in light transmission through interior cedarhemlock forests of British Columbia. *Canadian Journal Forest Research*,. 29: 1775–83.

- Carmago J.L.C. and V. Kapos. 1995. Complex edge effects on soil moisture and microclimate in central Amazonian forest. *Journal of Tropical Ecology*, 11: 205-221
- Chantanaorapint S. 2010. Ecological studies of epiphytic bryophytes along altitudinal gradients in Southern Thailand. Dissertation. Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen-Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- Chen J., J. F. Franklin, and T. A. Spies. 1993. Contrasting microclimates among clearcut, edge, and interior of old-growth Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 63 : 219 – 237
- Chen J.Q., J.F. Franklin and T.A. Spies. 1995. Growing-season microclimatic gradients from clear-cut edges into old-growth Douglas-fir forests. *Ecol. Appl.* 5: 74 –86.
- Chen J. and J F. Franklin, 1997. Growing season microclimate variability within an old-growth Douglas-fir forest. *Climate Research*, 8 : 21 - 34
- Chen J., S.C. Saunders, T.R. Crow, R.J. Naiman, K.D. Brosofske, B.L. Brookshire, and J. F. Franklin. 1999. Microclimate forest ecosystem and landscape ecology. *BioScience* : 49 (4) : 38 - 48
- Christian, R. 2005. Interactive effects of salinity and irradiance on photoprotection in acclimated seedlings of two sympatric mangroves. *Trees* 19: 596–606.
- Cienciala E., P.E. Mellander, J. Kucera, M. Oplustilova, M. Ottosson-Lofvenius and K. Bishop. 2002. The effect of a north-facing forest edge on tree water use in a boreal Scots pine stand. *Can. J. For. Res.* 32: 693 –702.
- Cintron G. and Y.S. Novelli. 1984. Methods for studying mangrove structure. In: Snedaker, S.C., Snedaker, J.G. (Eds.), *The Mangrove Ecosystem: Research Methods*, UNESCO, Paris, pp. 91–113.
- Clark, T. P., and F. F. Gilbert. 1982. Ecotones as a measure of deer habitat quality in central Ontario. *Journal of Applied Ecology* 19:751-758.
- Cohen M.C.L. and R.J. Lara. 2003. Temporal changes of mangrove vegetation boundaries in Amazonia: application of GIS and remote sensing techniques. *Wetlands Ecol. Manage.* 11: 223–231.
- Cronin J.T. and K.J. Haynes. 2004. An invasive plant promotes unstable host-parasitoid patch dynamics. *Ecology*, 85: 2772-2782
- Cubina A., and T. M. Aide. 2001. The effect of distance from forest edge on seed rain and soil seed bank in a tropical pasture. *Biotropica* 33:260-267.
- Dahdouh-Guebas F. and N. Koedam. 2008. Long-term retrospection on mangrove development using transdisciplinary approaches: A review. *Aquat. Bot.* 89: 80–92.

- Dahdouh-Guebas F., E. Van Hiel, J.C. Chan, L.P. Jayatissa and N. Koedam. 2005. Qualitative distinction of congeneric and introgressive mangrove species in mixed patchy forest assemblages using high spatial resolution remotely sensed imagery (IKONOS). *Syst. Biodivers.* 2: 113–119.
- Darren F. W., and R. J. Harris, 2005. Invasibility of native habitats by Argentine ants, *Linepithema humile*, in New Zealand. *New Zealand Journal of Ecology*, 29(2): 215-219
- Davies-Colley R.J., G. W. Payne and M. van Elswijk. 2000. Forest microclimate gradients. *New Zealand Journal of Ecology*, 24(2): 111-121
- De Siqueiran L.P, M. B. de Matos, D. M. S. Matos, R. de Cássia Q. Portela, M. I. G. Braz, and L. Silva-Lima. 2004. Using the variances of microclimate variables to determine edge effects in small Atlantic rain forest fragment, South-Eastern Brazil. *Ecotropica* 10: 59-64
- De Souza J.R.S., M. Makino, R.L. C. De Araujo, J.C.P. Cohen and F.M.A.Pinheiro, 2006. Thermal properties and heat fluxes in soils under forest and pasture, in Maraba, Pa, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21(3): 89-103.
- Didham R.K., P.M. Hammond, J.H. Lawton, N.E. Stork. 1998. Beetle species responses to tropical forest fragmentation. *Ecol Monogr* 68: 295–323.
- Didham R.K. and J. H. Lawton. 1999. Edge structure determines the magnitude of changes in microclimate and vegetation structure in tropical forest fragments. *Biotropica*, 31(1): 17-30.
- Dignan P. and L. Bren. 2003. Modelling light penetration edge effects for stream buffer design in Mountain Ash Forest in Southeastern Australia. *Forest Ecology and Management* 179: 95-106.
- Dong J, J. Chen, K.D. Brososfke and R.J. Naiman. 1998. Modelling air temperature gradients across managed small streams in Western Washington. *Journal of Environmental Management* 53: 309–321.
- Doyle, T.W., Smith, T.J., Robblee, M.B., 1995. Wind damage effects of Hurricane Andrew on mangrove communities along the southwest coast of Florida, USA. *J. Coast. Res.* 21, 159–168.
- Drever C.R., K.P Lertzman. 2003. Effects of a wide gradient of retained tree structure on understory light in coastal Douglas-fir forests. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 137–146.
- Duke, N.C. 1992. Mangrove floristics and biogeography. In —Tropical Mangrove Ecosystems (A.I. Robertson and D.M. Alongi, eds), pp.63-100. American Geophysical Union, Washington DC., USA.
- Duke N.C. 2001. Gap creation and regenerative processes driving diversity and structure of mangrove ecosystems. *Wetlands Ecol. Manage.* 9, 257–269.
- Dunham J., B. Rieman and G. Chandler. Influences of Temperature and Environmental Variables on the Distribution of Bull Trout within Streams at the Southern Margin of Its Range. 2003. *North American Journal of Fisheries Management*, 23: 894–904

- Duniway M.C., K.A. Snyder and J.E. Herrick. 2010. Spatial and temporal patterns of water availability in a grass-shrub ecotone and implications for grassland recovery in arid environments. *Ecohydrology*, 3:55–67.
- Ehrenfeld J.G., X. Han, W.F.J. Parsons and W. Zhu. 1997. On the nature of environmental gradients: temporal and spatial variability of soils and vegetation in the new Jersey Pinelands. *Journal Ecology*, 85: 785–798.
- Ellison, J., and D. Stoddart, 1991. Mangrove ecosystem collapse during predicted sea level rise: Holocene analogues and implications. *Journal of Coastal Research* 7(1): 151-165.
- Ellison J. 2005. Impacts on mangrove ecosystems. The Great Greenhouse Gamble: A conference on the Impacts of Climate Change on Biodiversity and Natural Resource Management: Conference Proceedings, Sydney, NSW, EJ.
- Ewers R.M. and R.K. Didham. 2006. Confounding factors in the detection of species responses to habitat fragmentation. *Biol Rev*, 81: 117–142.
- Ewers R.M., S. Thorpe, R.K. Didham. 2007. Synergistic interactions between edge and area effects in a heavily fragmented landscape. *Ecology*, 88: 96–106.
- Fagan, W.F., R.S. Cantrell, and C. Cosner. 1999. How habitat edges change species interactions. *The American Naturalist* 153:165-182.
- Feng Q, J. Si, Y. Zhang, J. Yao, W. Liu and Y. Su. 2006. Microclimatic characteristics of the Heihe oasis in the hyperarid zone of China. *Journal of Geographic Science* 16(1): 34 - 44
- Field C.D. 1995. Impacts of expected climate change on mangroves. *Hydrobiologia* 295(1): 75-81.
- Fisher R.F. and Binkley D. 2000. *Ecology and Management of Forest Soils*. John Wiley and Sons, New York.
- Fletcher R. J. 2005. Multiple edge effects and their implication in fragmented landscapes. *Journal of Animal Ecology* 74:342-352.
- Fraver S. 1994. Vegetation responses along edge –to-interior gradients in the mixed hardwood forest of the Roaneke River basin, North Carolina. *Conservation Biology*, 8: 822-832.
- Fromard F., H. Puig, E. Mougin, G. Marty, J.L. Be´toulle and L. Cadamuro. 1998. Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana. *Oecologia*, 115: 39–53.
- Fromard F., C. Vega and C. Proisy. 2004. Half a century of dynamic coastal change affecting mangrove shorelines of French Guiana. A case study based on remote sensing data analyses and field surveys. *Mar. Geol.* 208: 265–280
- Game M. 1980. Best shape for nature reserves. *Nature* 287: 630-632.

- Gehlhausen S.M., M.W. Schwartz and C.K. Augspurger. 2000. Vegetation and microclimatic edge effects in two mixed-mesophytic forest fragments. *Plant Ecol.* 147: 21–35.
- Georgi N.J. and K. Zafiriadis, 2006. The impact of park trees on microclimate in urban areas. *Journal Urban Ecosystem.* ISBN/ISSN : 1083-8155.
- Giesen, W., S. Wulffraat, M. Zieren and L. Scholten. 2007. *Mangrove guidebook for Souteast Asia.* FAO and Wetlands International. Printed by: Dharmasarn Co., Ltd.
- Gilman E, H.V.Lavieren, J. Ellison, V. Jungblut, L. Wilson, F. Areki., G. Brighthouse, J. Bungitak, E. Dus, M. Henry, M Kilman, E. Matthews, L.Sauni Jr., N.Teariki-Ruatu, S. Tukia, K. Yuknavage, 2006. Pacific island mangroves in a changing climate and rising sea. UNEP Regional Seas Reports and Studies No. 179. 2006.
- Gladstone W. and M.J. Schreider. 2003. Effects of pruning a temperate mangrove forest on the associated assemblages of macroinvertebrates. *Marine and Freshwater Research*, 54: 683-690.
- Godefroid S. and N. Koedam. 2003. Distribution pattern of the flora in a peri-urban forest: an effect of the city–forest ecotone. *Landscape and Urban Planning* 65: 169–185
- Godefroid S., S. Rucquoj and N. Koedam. 2006. Spatial variability of summer microclimates and plant species response along transects within clearcuts in a beech forest. *Plant Ecology* 185: 107 –121
- Godefroid S., D. Monbaliu, N. Koedam, 2007. The role of soil and microclimatic variables in the distribution patterns of urban wasteland flora in Brussels, Belgium. *Landscape and Urban Planning* 80: 45–55
- Goldblum D. and S.W. Beatty. 1999. Influence of an old field/forest edge on a northeastern United States deciduous forest understory community. *Journal of the Torrey Botanical Society.* 126: 335-443.
- Gradstein R. 2008. Influence of forest modification and climate change on epiphytic bryophyte diversity in the tropics. Paper presented at Annual Meeting of the Association for Tropical Biology and Conservation, Panamaribo 9-13 June, 2008
- Granek E., and B. I. Ruttenberg, 2008. Changes in biotic and abiotic processes following mangrove clearing. Volume: 80, Issue: 4, Publisher: Elsevier Ltd, Pages: 555-562
- Gray A. N., T.A. Spies and M.J. Easter. 2002. Microclimate and soil moisture responses to gap formation in coastal Douglas-fir forests. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 332-343.
- Hagan J.M. and A.A. Whitman, 2000. Microclimate changes across upland and riparian clearcut-forest boundaries in Maine. *In: Mosaic Science Notes* 2000-4. Manomet Center for Conservation Sciences, Manomet, Maine, 6 pp.

- Hale S.E. 2001. Light regime beneath Sitka spruce plantations in northern Britain: preliminary results. *Forest Ecology and Management* 151: 61–66.
- Hale S.E. 2003. The effect of thinning intensity on the below-canopy light environment in a Sitka spruce plantation. *Forest Ecology and Management* 179: 341–349.
- Hanba Y.T., H.Kogami, I. Terashima. 2002. The effect of growth irradiance on leaf anatomy and photosynthesis in *Acer* species differing in light demand. *Plant Cell Environ* 25: 1021–1030
- Harper K.A., S.E. MacDonald, P.J. Burton, J. Chen, K.D. Brosofske, S.C. Saunders, E.S. Euskirchen, D. Roberts, M.S. Jaiteh and R.A. Esseen. 2005. Edge influence on forest structure and composition in fragmented landscape. *Conservation Biology*, 19(3): 768-782
- Hawley T.J. 2010. Influence of forest cover on tadpole vital rates in two tropical treefrogs. *Herpetological Conservation and Biology* 5(2): 233-240.
- Haynes K.J. and J.T. Cronin, 2006. Interpatch movement and edge effects: the role of behavioral responses to the landscape matrix. *Oikos* 113: 43 -/54
- Heinke J, I. Kowarik and A. Tye. 2009. Destruction without extinction: long-term impacts of an invasive tree species on Gala' pagos highland vegetation. *Journal of Ecology*, 97: 1252–1263
- Heithecker T.D. and Ch.B. Halpern. 2007. Edge-related gradients in microclimate in forest aggregates following structural retention harvests in western Washington. *Forest Ecology and Management*, 248(3): 163-173
- Hennenberg K.J, D. Goetze, J. Szarzynski, B. Orthmann, B. Reineking, I. Steinke and S. Porembski. 2008. Detection of seasonal variability in microclimatic borders and ecotones between forest and savanna. *Basic and Applied Ecology*, 9(3): 275 – 285.
- Hernandez-Cornejo R., N. Koedam, A. Ruiz Luna, M. Troell and F. Dahdouh-Guebas. 2005. Remote sensing and ethnobotanical assessment of the mangrove forest changes in the Navachiste-San Ignacio-Macapule lagoon complex, Sinaloa, Mexico. *Ecol. Soc.* 10: 16 – 24.
- Hernández C.T., G. de la Lanza Espino and D.E.O Belmonte. 2011. Impact of logging on a mangrove swamp in South Mexico: Cost/benefit analysis. *Rev. biol. Trop*, 49(2): 85-97
- Hetherington E.D. 1987. The Importance of forests in the hydrological regime. *In: Canadian Aquatic Resources*, M.C. Healy and R.R. Wallace (Editors.). Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic 215, Canada Department of Fisheries and Oceans, Ottawa, Canada, pp.179-211.
- Hollins S.E. and P.V. Ridd. 1997. Evaporation over a tropical tidal salt flat. *Mangroves and Salt Marshes*, 1: 95–102.

- Ibrom A, A. Oltchev, T. June, T. Ross ,H. Kreilein, U. Falk, J. Merklein, A. Twele, G. Rakkibu, S. Grote, A. Rauf and G. Gravenhorst. 2007. *Effects of land-use change on matter and energi exchange between ecosystems in the rain forest margin and the atmosphere*. Springer Verlag, Berlin. p. 463–492.
- Iverson L.R and T.F. Hutchinson. 2002. Soil temperature and moisture fluctuations during and after prescribed fire in mixed-oak forests. *Nat. Areas J.* 22: 296–304.
- Jeffrey D. P. and Th. W. Sherry. 1994. Sexual habitat segregation by American redstarts wintering in Jamaica; Importance of Resource Seasonability. *The Auk* 111(1):38-49, 1994
- Jennings S.B., N.D. Brown and D. Shell. 1998. Assessing forest canopies and understory illumination: canopy closure and canopy cover and other measures. *Forestry* 72(1): 59-73
- Kapos V. 1989. Effects of isolation on the water status of forest patches in the Brazilian Amazon. *Journal of Tropical Ecology* 5: 173-185.
- Kapos V., E. Wandelli, J.L. Camargo, and G. Ganade. 1997. Edge-related changes in environment and plant responses due to forest fragmentation in central Amazonia. In: Laurance, W.F.; Bierregaard, R.O. Jr (Editors), *Tropical forest remnants. Ecology, management and conservation of fragmented communities*, pp. 33- 44. University of Chicago Press, Chicago, U.S.A.
- Karr J.R. and K.E. Freemark. 1983. *Habitat selection and environmental gradients dynamics in the “stable” tropics*. *Ecology*, 64(6): 1481-1494.
- Kathiresan K and B.L. Bingham. 2001 Biology of mangroves and mangrove ecosystems. *Marine Biology* 40: 81 – 251
- Kathiresan K. 2004. *Ecology and Environment of Mangrove Ecosystems*. Centre of Advanced Study in Marine Biology, Annamalai University, pp 101-115
- Keller M. 2005. Optical remote sensing to monitor selective logging activity in the Amazon Region of Brazil. International Institute of Tropical. Annual Letter 2010 – 2011.
- Kimberly D.B., J. Chen, R.J. Naiman, and J.F. Franklin. 1997. Harvesting effects on microclimate gradients from small streams to pland in Western Washington. *Ecological Applications*, 7(4): 1188–1200
- Kjerfve B. 1990. Manual for investigation of hydrological processes in mangrove ecosystems. The UNESCO/UNDP Regional Project —Mangrove Ecosystems in Asia and the Pacific AS/79/002 and RAS/86/120, Thomson Press, 79pp.
- Kjerfve B. and D.J. Macintosh. 1997. The impact of climatic changes on mangrove ecosystems. In: Mangrove ecosystems studies in Latin America, Kjerfve, D., Lacerda, L.D. and Diop E.S. (Eds.), UNESCO/International Society for Mangrove Ecosystems, p 1 – 7.

- Kobashi D. and Y. Mazda (2005): Tidal flow in riverine-type mangroves. *Wetlands Ecology and Management*, 13, 615– 619.
- Kora, C., M.R. McDonald and G.J. Boland. 2005. Lateral clipping of canopy influences the microclimate and development of apothecia of *Sclerotinia sclerotiorum* in carrots. *Plant Dis.* 89: 549-557
- Krauss K.W. and J.A. Allen. 2003. Factors influencing the regeneration of the mangrove *Bruguiera gymnorrhiza* (L) Lamk. on a tropical Pacific island. *Forest Ecol. Manage.* 176: 49–60.
- Krauss K.W., T.W. Doyle, R.R. Twilley, T.J. Smith, K.R.T. Whelan and J.K. Sullivan. 2005. Woody debris in the mangrove forests of south Florida. *Biotropica* 37: 9–15.
- Krauss K.W., C.E. Lovelock, K.L. McKee, L. Lo’pez-Hoffman, S.M.L. Ewe and W.P. Sousa. 2008. Environmental drivers in mangrove establishment and early development: A review. *Aquatic Botany* 89: 105–127
- Kusmana, C., S. Wilarso, I. Hilwan, P. Pamoengkas, C. Wibowo, T. Tiryana, A. Triswanto, Yunasfi dan Hamzah. 2003. Teknik rehabilitasi mangrove. Fakultas Kehutanan-Institut Pertanian Bogor.
- Kusmana C. 2009. Pengelolaan Sistem Mangrove Secara Terpadu. Materi Workshop Pengelolaan Ekosistem Mangrove di Jawa Barat, di Jatinangor, 18 Agustus 2009
- Laurance W.F. 2000. Do edge effects occur over large spatial scales? *Trends in Ecology and Evolution* 15: 134–135.
- Laurance W.F. 2002. Hyperdynamism in fragmented habitats. *Journal Vegetation Science* 13: 595–602.
- Laurance W.F., T.E. Lovejoy, H.L. Vasconcelos, E. Bruna, R.K. Didham 2002. Ecosystem decay of Amazonian forest fragments: a 22-year investigation *Conservation Biology* 16: 605–618.
- Laurance W.F., H.E.M. Nascimento, S.G. Laurance, A. Andrade A, P.M. Fearnside. 2006. Rain forest fragmentation and the proliferation of successional trees. *Ecology* 87: 469–482.
- Laurance W.L., H.E.M. Nascimento, S.G. Laurance, A. Andrade, R.M. Ewers, K.E. Harms, R.C.C. Luiza, and J. E. Ribeiro. 2007. Habitat Fragmentation, Variable Edge Effects, and the Landscape-Divergence Hypothesis. *PLoS ONE* 2(10): 1 - 8
- Laurance W.F. 2008. Edge effects drive hyperdynamism and altered species interactions in Amazonian forest fragments. Paper presented at Annual Meeting of the Association for Tropical Biology and Conservation, Panamaribo 9-13 June, 2008
- Lewis R.R. 2005. Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forests. *Ecol. Eng.* 24(4): 403-418.

- Lidicker W. Z. 1999. Responses of mammals to habitat edges: an overview. *Landscape Ecology* 14: 333-343.
- Lieffers V.J., C. Messier, F. Gendron and P.G Comeau. 1999. Predicting and managing light in the understory of boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 29: 796-811.
- Liechty H.O., M.J. Holmes, D.D. Reed and G.D. Mroz, G.D. 1992. Changes in microclimate after stand conversion in two northern hardwood stands. *For. Ecol. Manage.*, 50: 252–264.
- Lo'pez-Hoffman, L., J.L. DeNoyer, J.E. Monroe, R. Shaftel, N.P.R. Anten, M. Ramos and D.D. Ackerly. 2006. Mangrove seedling net photosynthesis, growth, and survivorship are interactively affected by salinity and light. *Biotropica* 38: 606–616.
- Lo'pez-Hoffman, L., N.P.R. Anten, M. Ramos and D. Ackerly. 2007. Salinity and light interactively affect neotropical mangrove seedlings at the leaf and whole plant levels. *Oecologia* 150: 545–556.
- Lugo, A.E. 2000. Effects and outcomes of Caribbean hurricanes in a climate change scenario. *Science Total Environment*, 262: 243–251.
- Lucas R.M., J.C. Ellison, A. Mitchel, B. Donnelly, M. Finlayson and A.K. Milne. 2002. Use of stereo aerial photography for quantifying changes in the extent and height of mangroves in tropical Australia. *Wetlands Ecol. Manage.* 10: 159–173.
- Luther D.A.S., and R. Greenberg. 2009. Mangroves: A global perspective on the evolution and conservation of their terrestrial vertebrates. *BioScience* 59(7): 602-612
- Ma S., A. Concilio, B.B. Okaley, M. North and J. Chen. 2010. *Spatial variability in microclimate in a mixed-conifer forest before and after thinning and burning treatments. Forest Ecology and Management*, 259(5): 904-915.
- Magnuson, J.J., L.B. Crowder and P.A. Medvick. 1979. Temperature as an ecological resource. *American Zoologist*, 19: 331–343.
- Malanson G.P. and D.M. Cairns. 1995. Effects of increased cloud-cover on a montane forest landscape. *Ecoscience* 2(1): 75 - 82
- Malcolm J.R. 1994. Edge effects in central Amazonian forest fragments. *Ecology* 75: 2438–2445.
- Manson R.H., R.S. Ostfeld, and C. D. Canham. 1999. Responses of a small mammal community to heterogeneity along forest-old-field edges. *Landscape Ecology* 14:355-367.
- Matlack G. R. 1993. Microenvironment variation within and among forest edge sites in the eastern United States. *Biological Conservation*, 66: 185–194.
- Matlack G. R. 1994. Vegetation Dynamics of the Forest Edge -- Trends in Space and Successional Time. *The Journal of Ecology*, 82(1): 113-123
- Matlack G.R. and J.A. Litvaitis. 1999. Forest edges. *In: Hunter, M.L. Jr.*

- (Editor), *Maintaining biodiversity in forest ecosystems*, pp. 210-233. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Mazda Y., Y. Sato, S. Sawamoto, H. Yokochi and E. Wolanski. 1990. Links between physical, chemical and biological processes in Bashita-Minato, a mangrove swamp in Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 31: 817–833.
- Mazda, Y., D. Kobashi and S. Okada, 2005. Tidal-scale hydrodynamics within mangrove swamps. *Wetlands Ecology and Management*, 13, 647–655
- Mazda Y. and K. Kamiyama. 2007. Tidal deformation and inundation characteristics within mangrove swamps. *Mangrove Sci.* 4(5): 21–29.
- Mazda Y, E Wolanski, P.V. Ridd. 2007. The Role of Physical Processes in Mangrove Environments. Manual for the Preservation and Utilization of Mangrove Ecosystems. TERRAPUB, Tokyo
- Mazda Y. and E. Wolanski. 2009. Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach. Chapter-8: Hydrodynamics and modeling water flow in mangrove areas. Elsevier, p. 231. ISBN: 978-0-444-53103-2
- McCaughey J.H., B.D. Amiro, A.W. Robertson, and D.L. Spittlehouse. 1997. Forest Environments. *In: The Surface Climates of Canada*, W.G. Bailey, T.R. Oke and W.R. Rouse (Editors.). McGill University Press, Kingston, Ontario, Canada, pp. 247-276.
- Medeiros C. and B. Kjerfve. 1993. Hydrology of a tropical estuarine system: Itamaraca, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 36: 495–515
- Meerman J. 2000. Feasibility study of the proposed northern belize biological corridors project (NBBCP) Volume II: monitoring report.
- Mendoza E., J. Fay and R. Dirzo. 2005. A quantitative analysis of forest fragmentation in Los Tuxtlas, southeast Mexico: patterns and implications for conservation. *Revista Chilena de Historia Natural* 78: 451-467.
- Meyer C.L., T.D. Sisk and W.W. Covington. 2001. Microclimatic changes induced by ecological restoration of ponderosa pine forests in Northern Arizona. *Restoration Ecology* 9(4): 443 - 452
- Miura M., T. Manabe, N. Nishimura and S. Yamamoto. 2001. Forest canopy and community dynamics in a temperate old-growth evergreen broad-leaved forest, south-western Japan: a 7-year study of a 4-ha plot. *Journal Ecology*, 89: 841–849
- Mohamed O.S.M, G. Neukermans, J.G. Kairo, F. Dahdouh-Guebas and N. Koedam. 2009. Mangrove forests in a peri-urban setting: the case of Mombasa (Kenya). *Wetlands Ecol Manage*, 17: 243–255
- Monteith, J. L., 1975. *Pinciples of environmental physics*. Edward Arnold, London. p. 82 – 88

- Moore R.D., D.L. Spittlehouse and A. Story. 2005. Riparian microclimate and stream temperature response to forest harvesting: A review. *Journal of the American Water Resources Association* 41: 813-834.
- Morrisey D., C. Beard, M. Morrison, R. Craggs, and M. Lowe. 2007. The New Zealand mangrove: review of the current state of knowledge. Auckland Regional Council Technical Publication Number 325
- Mueller E.C., T.A. Day. 2005. The effect of urban ground cover on microclimate, growth and leaf gas exchange of oleander in Phoenix, Arizona. *Int. J. Biometeorol.* 49: 244–255.
- Murcia C. 1995. Edge effects in fragmented forests: implications for conservation. *Trends in Ecology and Evolution* 10(2) :58-62.
- Mwaipopo R. and J. M. Lufumbi, 2009 : An assessment of the socio-economic implications of PADH due to coastal tourism; mangrove destruction; and mining/sediment , Nairobi Convention UNEP/GPA Coordination Office
- Naiman R.J., R.E. Bilby and P.A. Bisson. 2000. Riparian ecology and management in the Pacific Coastal rain forest. *BioScience* 50: 996-1011.
- Nascimento H.E.M, A. Andrade, J. Camargo, S.W. Laurance, S.G. Laurance. 2006. Effects of the surrounding matrix on tree recruitment in Amazonian forest fragments. *Conservation Biology* 20: 853–860.
- Nelson T., R. Macedo and B.E. Valentine. 2007. A Preliminary study of streamside air temperatures within the coast redwood zone 2001 to 20031 USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-194. pp 75-84
- Newmark W.D. 2001. Tanzanian forest edge microclimatic gradients: dynamic patterns. *Biotropica* 33: 2 –11.
- Niinemets U. and O. Kull. 1995 Effects of light availability and tree size on the architecture of assimilative surface in the canopy of *Picea abies*: variation in shoot structure. *Tree Physiol* 15:791–798
- North, M., B. Oakley, R. Fiegenger, A. Gray and M. Barbour. 2005. Influence of light and soil moisture on the Sierran mixed-conifer understory communities. *Plant Ecology* 177: 3–24.
- Ogunsote O.O and B. Prucnal-Ogunsote, 2002. Control of Tropical Microclimates through Landscape Design: Concepts and Methods. Working paper presented at the National Workshop on Landscape Design for the Federal Capital Development Authority, Abuja by the Department of Architecture, Ahmadu Bello University, Zaria. April 17 – May 10, 2002
- Örlander G. and O. Langvall. 1993. The ASA Shuttle – A sSystem for mobile sampling of air temperature and radiation. scandinavian. *Journal of Forest Research*, 8: 359-372.
- Orrock, J. L., and B. J. Danielson. 2005. Patch shape, connectivity, and foraging by oldfield mice (*Peromyscus polionotus*). *Journal of Mammalogy* 86: 569-575.

- Parmesan C. and G. Yohe. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421: 37–42
- Paula J., R.N. Mendes, J. Mwaluma, C. Raedig and W. Emmerson. 2003. Combined effects of temperature and salinity on larval development of the mangrove crab *Parasesarma catenata*. *J. Mar.Sci.*, 2(1): 57 -63
- Peterson C.J. 2004. Within-stand variation in windthrow in southern boreal forests of Minnesota: is it predictable?. *Canadian Journal Forest Research*, 34: 365–375
- Pinto S.R.R., G. Mendes, A.M.M. Santos, M. Dantas, M. Tabarelli and F.P. L. Melo. 2010. Landscape attributes drive complex spatial microclimate configuration of Brazilian Atlantic forest fragments *Tropical Conservation Science*, 3(4): 389-402
- Pohlman C.L., S.M. Turton and M. Goosem. 2007. Edge effects of linear canopy openings on tropical rain forest understory microclimate. *Biotropica*, 39: 62-71.
- Pohlman C.L., S.M. Turton, and M. Goosem. 2009. *Temporal variation in microclimatic edge effects near powerlines, highways and streams in Australian tropical rainforest. Agricultural and Forest Meteorology*, 149 (1): 84-95.
- Polii B., 2009. Bahan kuliah ekosistem sumberdaya alam. Program S3 Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan. Pusat Studi lingkungan Universitas Sam Ratulangi, Manado
- Pomeroy J.W. and B.E. Goodison. 1997. Winter and Snow. *In: The Surface Climates of Canada*, W.G. Bailey, T.R. Oke and W.R. Rouse (Editors). McGill University Press, Kingston, Ontario, Canada, pp. 60-100.
- Potter B.E., R.M. Teclaw and J.C. Zasada. 2001. The impact of forest structure on near-ground temperatures during two years of contrasting temperature extremes. *Agric. For. Meteorol.* 106: 331–6.
- Raghu S., R.A.I. Drew and A.R. Clarke, 2004. Influence of host plant structure and microclimate on the abundance and behavior of a tephritid fly. *Journal of Insect Behavior*. 12: 179-190
- Rajpar M.N. and M. Zakaria. 2011. Bird species abundance and their correlation with microclimate and habitat variables at Natural Wetland Reserve, Peninsular Malaysia. *International Journal of Zoology*, 2011: 1 - 17
- Rambo T.R., and M.P. North. 2008. Spatial and temporal variability of canopy microclimate in a Sierra Nevada riparian forest. *Northwest Science*, 82(4): 259-268
- Ramos F.N. and F.A.M. Santos. 2006. Microclimate of Atlantic forest fragments: regional and local scale heterogeneity. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 49(6) : 935-944

- Raynor G.S. 1971. Wind and temperature structure in a coniferous forest and contiguous field. *Forest Science* 17: 351-363.
- Redding T.E., G.D. Hope, M.J. Fortin, M.G. Schmidt and W.G. Bailey. 2003. Spatial patterns of soil temperature and moisture across subalpine forest-clearcut edges in the southern interior of British Columbia. *Canadian Journal Soil Science*, 83: 121–33.
- Renhorn K.E., P.A. Esseen, K. Palmqvist and B. Sundberg. 1997. Growth and vitality of epiphytic lichens. Responses to microclimate along a forest edge-interior gradient. *Oecologia* 109: 1–9.
- Rich M.P., D.B. Clark, D.A. Clark and S.F. Oberbauer. 1993. Long-term study of solar radiation regimes in a tropical wet forest using quantum sensors and hemispherical photography, *Agric. For. Meteorol.* 65: 107–127.
- Ridd P.V., M.W. Sandstrom and E. Wolanski. 1988. Outwelling from tropical tidal saltflats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 26: 243–253.
- Ridd P.V. and T. Stieglitz. 2002. Dry season salinity changes in tropical mangrove and salt flat fringed estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54: 1039–1049.
- Ries, L., R. J. Fletcher, J. Battin, and T. D. Sisk. 2004. Ecological responses to habitat edges: mechanisms, models and variability explained. *Annual Review in Ecology, Evolution, and Systematics* 35:491-522.
- Rijkers T., T.L. Pons, F. Bongers. 2000 The effect of tree height and light availability on photosynthetic leaf traits of four neotropical species differing in shade tolerance. *Funct Ecol* 14: 77–86
- Ringold P.L., J. Van Sickle, K. Rasar and J. Schacher. 2003. Use of hemispheric imagery for estimating stream solar exposure. *Journal of the American Water Resources Association* 39: 1373-1383
- Root T.L., J.T. Price, K.R. Hall, S.H. Schneider, C. Rosenzweig and J.A. Pounds. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* 421:57–60
- Rosenberg N.J., L.B. Blaine and B.V. Shashi, 1985. *Microclimate*. John Wiley and Sons. p. 43 – 46
- Ruitenbeek J.H. 2002. Modelling economy-ecology linkages in mangroves: Economic evidence for promoting conservation in Bintuni Bay, Indonesia
- Rutherford J.C., S. Blackett, C. Blackett, L. Saito and R.J. Davies-Colley. 1997. Predicting the effects of shade on water temperature in small streams. *NewZealand Journal of Marine and Freshwater Research* 31: 707-722.
- Saenger P. 1998. Mangrove vegetation: An evolutionary perspective. *Marine and Freshwater Research*, 49(4): 277-286.
- Santoso N. 2000. Pola Pengawasan Ekosistem Mangrove. Makalah disampaikan pada Lokakarya Nasional Pengembangan Sistem Pengawasan Ekosistem Laut Tahun 2000. Jakarta, Indonesia.

- Saunders J.E., M.J. Attrill, S. M. Shaw, A.A. Rowden. 2003. Spatial variability in the epiphytic algal assemblages of *Zostera marina* seagrass beds. *Marine Ecology Progress Series* 249: 107–115
- Schahezenski J. and H. Hill. 2009. *Agriculture, Climate Change and Carbon Sequestration*. ATTR Pub
- Sellars H.C., B.A. Gardiner, A.P.Morse and A.J. Challinor. 2001. Forest microclimate variability data and its use in testing a 1D model. Forest Research, Midlothian, UK.
- Setiawan, D.S. dan K. Winarno, 2006. Pemanfaatan langsung ekosistem mangrove di Jawa Tengah dan penggunaan lahan di sekitarnya; kerusakan dan upaya restorasinya. *Biodiversitas* 7 (3): 282 – 291
- Setyawan A.D. 2005. Keaneka ragaman tumbuhan mangrove di pantai utara dan selatan Jawa Tengah. Thesis. Program Studi Ilmu Lingkungan, Program Pasca Sarjana, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Smith A.P., K.P Hogan, J.R. Idol. 1992. Spatial and temporal patterns of light and canopy structure in a lowland tropical moist forest. *Biotropica* 24: 503–511
- Smith T.J., M.B. Robblee, H.R. Wanless and T.W. Doyle. 1994. Mangroves, hurricanes, and lightning strikes. *BioScience* 44: 256–262.
- Snedaker, S. 1995. Mangroves and climate change in the Florida and Caribbean region: scenarios and hypotheses. *Hydrobiologia* 295:43-49
- Soemodihardjo, S., P. Wiroatmodjo, F. Mulia, and M.K.Harahap, 1996. Mangroves in Indonesia—a case study of Tembilahan, Sumatra. Restoration of Mangrove Ecosystems. International Society for Mangrove Ecosystems, Okinawa, Japan, p. 97-110.
- Sone K, K. Noguchi and I. Terashima. 2005. Dependency of branch diameter growth in young Acer trees on light availability and shoot elongation. *Tree Physiol* 25:39–48
- Spittlehouse D.L. 1998. Rainfall Interception in Young and Mature Coastal Conifer Forest. In: Mountains to Sea: Human Interaction with the Hydrological Cycle, Y. Alila (Editor). Canadian Water Resources Association, Cambridge, Ontario, Canada, pp. 40-44.
- Spittlehouse D.L, R.S. Adams and R.D. Winkler. 2004. Forest, edge, and opening microclimate at Sicamous Creek. Research Report of Forest Science Program, Ministry of Forest British Columbia
- Sridhar V., A.L. Sansone, J. Lamarche, T. Dubin and D.P. Lettenmaier. 2004. Prediction of stream temperature in forested watersheds. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(1): 197-214.
- Studds C.E. and P. P. Marra. 2007. Linking fluctuations in rainfall to nonbreeding season performance in a long-distance migratory bird, *Setophaga ruticilla*. *Climate Research*, 35: 115–122

- Tabarelli M., A.V. Lopes and C.A. Peres. 2008. Edge-effects drive forest fragments towards an early-successional system. *Biotropica*, 40: 657-661.
- Tamatamah R.A. 2007 Environmental flow assessment (EFA) Wami River Basin, Tanzania. Literature review for BBM Workshop 2007. Wami-Ruvu Basin Water Office
- Tomlinson P.B. 1986. The botany of mangroves. Cambridge University Press, 419 p.
- Twilley R.R., J. Chen, V.H.Rivera-Monroy. 1999. Formulating a model of mangrove succession in the Caribbean and Gulf of Mexico with emphasis on factors associated with global climate change. *Curr. Top. Wetland Biogeochem.*, 3: 118–141.
- Van Bloem S.J. and Murphy P.G. 2005) The influence of hurricane winds on Caribbean dry forest structure and nutrient pools. *Biotropica*, 37: 571–583
- Vannini M, R. K. Ruwa and S. Cannicci, 1997. Effect of microclimatic faktors and tide on vertical migrations of the mangrove crab *Sesarma leptosoma* (Decapoda: Grapsidae) *Marine Biology* 130: 101-108
- Walther G.R., E. Post, P. Convey and A. Menzel. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416: 389–395.
- Wang L., W.P. Sousa, P. Gongand G.S. Biging. 2004. Comparison of IKONOS and QuickBird images for mapping mangrove species on the Caribbean coast of Panama. *Rem. Sens. Environ.* 91: 432–440.
- Wattayakorn G., E. Wolanski and B. Kjerfve, 1990. Mixing, trapping and outwelling in the Klong Ngao mangrove swamp, Thailand. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 31: 667–688.
- Wayman R. and M. North. 2007. Initial response of a mixedconifer understory plant community to burning and thinning restoration treatments. *Forest Ecology and Management* 239: 32-44.
- Williams-Linera G. 1990. Vegetation structure and environmental conditions of forest edges in Panama. *Journal of Ecology* 78: 356-373.
- Williams-Linera G., V. Dominguez-Gastelu and M.E. Garcia-Zurita. 1998. Microenvironment and floristics of different edges in a fragmented tropical rainforest. *Conserv. Biol.* 12: 1091 –1102.
- Wolanski E. 2006. The application of ecohydrology for sustainable development and management of mangrove dominated estuaries. The ICEMAN 2006 Mangrove Conference in Kuala Lumpur
- Wolanski E. 2008. Outline of the physical processes within mangrove systems, and its implications for biodiversity. *In*, Oceanographic Processes of Coral Reefs. CRC Press, London

- Woodroffe C.D. and J. Grindrod. 1991. Mangrove biogeography: the role of quaternary environmental and sea-level change. *Journal of Biogeography* 18: 479-492
- Xian-jun L., Z. Bi-guang and L.Wen-jun, 2003. Thermal diffusion in masson pine wood. *Forestry Studies in China*, 7(2):47-51
- Xu, M., J. Chen and B. L. Brookshire. 1997. Temperature and its variability in oak forests in the southeastern Missouri Ozarks. *Climate Research* 8: 209-223
- Yang X., D.R. Miller, and M.E. Montgomery. 1993. Vertical distributions of canopy foliage and biologically active radiation in a defoliated/refoliated hardwood forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 67:129-146.
- Yoko-o M., and M. Tokeshi, 2011. Morphological variation along the sea-land gradient: trees in a subtropical maritime woodland. *Journal Forest Research* 16: 55–61
- Young A. and N. Mitchell. 1994. Microclimate and vegetation edge effects in a fragmented podocarpbroadleaf forest in New Zealand. *Biological Conservation* 67: 63-72.
- Zheng D.L., J.Q. Chen, B. Song, M. Xu, P. Sneed and R. Jensen. 2000. Effects of silvicultural treatments on summer forest microclimate in southeastern Missouri Ozarks. *Climate Res.* 15: 45 –59.
- Zulkiflee A.L. and G.A. Blackburn. 2010. The effects of gap size on some microclimate variables during late summer and autumn in a temperate broadleaved deciduous forest. *International Journal of Biometeorology*, 54(2): 119-129