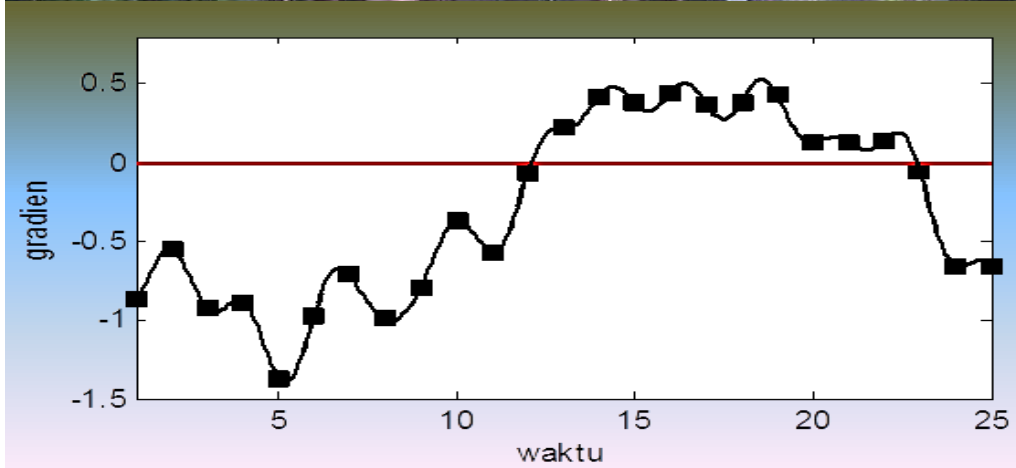


# **METODE PENELITIAN IKLIM MIKRO MANGROVE**



**Dr. Christophil Medellu, SU**  
**Dr. Ir. Semuel P. Ratag, MP**

**PENERBIT: UNIMA PRESS**

**2017**

**METODE PENELITIAN  
IKLIM MIKRO MANGROVE**

**Dr. Christophil Medellu, SU  
Dr. Ir. Samuel P. Ratag, MP**

**Penerbit: Unima Press**

copyright 2017

## KATA PENGANTAR

Pengelolaan ekosistem mangrove harus dilakukan secara seksama untuk menjamin keberlanjutan fungsi: ekologis, ekonomis dan sosial. Penelitian iklim mikro hutan mangrove dan interaksinya dengan lingkungan berbatasan dapat memberikan informasi dini tentang perubahan ekosistem mangrove dan pengaruh perubahan lingkungan berbatasan. Buku ini membahas konsep ekosistem mangrove, iklim mikro hutan mangrove (Bab I s/d Bab II) dan metode penelitian iklim mikro hutan mangrove yang mengadopsi dan mengembangkan model dan metode penelitian yang lazim digunakan dalam penelitian iklim mikro hutan (Bab III). Bab IV menyajikan contoh pengukuran, hasil analisis dan pemodelan matematik untuk menentukan besaran-besaran parameter iklim mikro serta interpretasi hasil analisis untuk mengkarakterisasi ekosistem mangrove dan berbagai informasi terkait kondisi ekosistem dan interaksi ekosistem mangrove dengan lingkungan berbatasan. Buku ini digunakan sebagai referensi penelitian dan kegiatan lapangan mahasiswa di jurusan/program studi: ilmu fisika dan pendidikan fisika, biologi dan pendidikan biologi, kelautan dan perikanan, kehutanan, geografi dll. Buku ini disusun dan diproduksi dengan dukungan dana penelitian Hibah Kompetensi DRPM Dikti, sehingga penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada DRPM Dikti. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada rekan dosen dan mahasiswa yang terlibat dalam kegiatan pengukuran dan analisis data hasil penelitian

Manado, Agustus 2017

Tim Penulis

Dr. Christophil Medellu, SU

Dr. Ir. Samuel P. Ratag, MP

## DAFTAR ISI

|  | hal |
|--|-----|
| BAB I PENDAHULUAN  | 1   |
| BAB II IKLIM MIKRO EKOSISTEM HUTAN MANGROVE  |     |
| 2.1. Ekosistem Hutan Mangrove  | 4   |
| 2.2. Radiasi Matahari dan Difusi Termal dalam Ekosistem Hutan  | 5   |
| 2.3. Iklim Mikro Hutan   | 8   |
| 2.4. Parameter Kuantitatif Iklim Mikro   | 15  |
| 2.5. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Perubahan Temporal dan Variasi Spasial Parameter Iklim Mikro Hutan          | 21  |
| 2.6. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Perubahan Temporal dan Variasi Spasial Parameter Iklim Mikro Hutan Mangrove | 25  |
| BAB III METODE PENELITIAN IKLIM MIKRO HUTAN MANGROVE   |     |
| 3.1. Adaptasi dan Adopsi Prinsip Penelitian Iklim Mikro Hutan  | 27  |
| 3.2. Adaptasi dan pengembangan parameter untuk karakterisasi iklim mikro hutan mangrove                          | 29  |
| 3.3. Variabel-variabel Penelitian Iklim Mikro Hutan Mangrove   | 32  |
| 3.4. Prosedur Pengukuran, Analisis dan Pemodelan   | 33  |
| BAB IV CONTOH HASIL ANALISIS– EMODELAN DAN PENENTUAN PARAMETER IKLIM MIKRO                                       |     |
| 4.1. Deskripsi Lokasi dan Kondisi Pengukuran Variabel Iklim Mikro  | 39  |
| 4.2. Hasil Analisis dan Pemodelan  | 39  |
| 4.3. Hasil Pengujian Model   | 43  |
| 4.4. Hasil Analisis dan Pengembangan Parameter Iklim Mikro   | 45  |
| 4.5. Analisis Komparatif Antar Transek   | 49  |
| BAB V PENUTUP  |     |
| Kesimpulan   | 68  |
| DAFTAR PUSTAKA   | 70  |

## DAFTAR TABEL

| No. Tabel | Judul  | Hal. |
|-----------|--|------|
| 3.1.      | Format data hasil pengukuran   | 33   |
| 4.1.      | Kondisi transek pengukuran pada tiga lokasi penelitian   | 39   |
| 4.2.      | Rataan akar pangkat dua dari kuadrat selisih data model – data pengukuran  | 43   |
| 4.3       | Rataan simpangan data model terhadap data pengukuran pada posisi 32 m dan 64 m dari tepi.                        | 44   |
| 4.4       | Sistem data parameter iklim mikro  | 49   |
| 4.5.      | Rangkuman hasil pemodelan dan analisis penentuan parameter untuk variabel suhu udara                             | 51   |
| 4.6.      | Rangkuman hasil pemodelan dan analisis penentuan parameter untuk variabel kelembaban udara                       | 57   |
| 4.7.      | Rangkuman hasil pemodelan dan analisis penentuan parameter untuk variabel kuat penerangan                        | 60   |
| 4.8.      | Rangkuman hasil pemodelan dan analisis penentuan parameter untuk variabel suhu air/tanah                         | 63   |
| 4.9       | Koefisien korelasi silang dan <i>time lag</i> antara perubahan kuat penerangan dengan perubahan suhu udara       | 65   |
| 4.10      | Koefisien korelasi silang dan <i>time lag</i> antara perubahan kuat penerangan dengan perubahan kelembaban udara | 66   |
| 4.11      | Koefisien korelasi silang dan <i>time lag</i> antara perubahan kuat penerangan dengan perubahan suhu air/tanah   | 67   |

## DAFTAR GAMBAR

| No. Gambar | Judul  | Hal. |
|------------|--|------|
| 2.1.       | Skema ekosistem (umpan-balik antar komponen) mangrove  | 5    |
| 2.2.       | Spektrum radiasi elektromagnetik   | 5    |
| 2.3.       | Kurva radiasi benda hitam  | 6    |
| 2.4.       | Skema difusi radiasi tampak mata dan difusi termal serta pengaruhnya terhadap perubahan iklim mikro ekosistem hutan dan lingkungan | 9    |
| 3.1.       | Kedudukan variabel dan parameter iklim mikro sebagai indikator kondisi hutan dan perubahan struktur hutan                          | 27   |
| 3.2.       | Skema adaptasi dan pengembangan penelitian iklim mikro di hutan mangrove   | 30   |
| 4.1.       | Perubahan temporal harian suhu udara di luar, di tepi dan di dalam hutan mangrove (transek 2 lokasi desa Talengen)                 | 40   |
| 4.2.       | Perubahan temporal harian kelembaban udara di luar, di tepi dan di dalam hutan mangrove (transek 2 lokasi desa Talengen)           | 40   |
| 4.3.       | Perubahan temporal harian suhu air/lumpur di luar, di tepi dan di dalam hutan mangrove (transek 2 lokasi desa Talengen)            | 40   |
| 4.4        | Perubahan temporal harian kuat penerangan di luar, di tepi dan di dalam hutan mangrove (transek 2 lokasi desa Talengen)            | 40   |
| 4.5        | Variasi spasial kelembaban udara jam 07.00, 12.00, 21.00 pada transek 2 lokasi desa Talengen                                       | 42   |
| 4.6        | Variasi spasial suhu air/tanah jam 07.00, 12.00, 21.00 pada transek 2 lokasi desa Talengen   | 42   |
| 4.7        | Variasi spasial kuat penerangan jam 07.00, 12.00, 15.00 pada transek 2 lokasi desa Talengen  | 42   |
| 4.8        | Variasi spasial suhu udara jam 07.00, 12.00, 21.00 pada transek 2 lokasi desa Talengen   | 42   |

## DAFTAR SIMBOL

| simbol                        | Deskripsi simbol   | Hal |
|-------------------------------|--|-----|
| A                             | Luas bidang dinamika gradien iklim mikro secara umum   | 36  |
| $a_m$                         | Koefisien fungsi Fourier berpadanan dengan komponen cosinus, dengan m adalah cacah harmonik                                  | 33  |
| $b_m$                         | Koefisien fungsi Fourier berpadanan dengan komponen sinus, dengan m adalah cacah harmonik                                    | 33  |
| G,<br>G(x),<br>G <sub>0</sub> | Gradien variabel iklim mikro (umum), gradien sebagai fungsi posisi (umum), gradien variable iklim di tepi ekosistem mangrove | 35  |
| H                             | Fluks panas  | 7   |
| h(x)                          | Fungsi posisi secara umum  | 35  |
| I, I(x)                       | Kuat penerangan, kuat penerangan sebagai fungsi posisi, satuan lux   | 35  |
| $r_s$                         | Koefisien korelasi silang  | 35  |
| T, T(t),                      | Suhu udara secara umum, suhu udara sebagai fungsi waktu; satuannya °C.   | 33  |
| t                             | Waktu, dalam satuan seconde atau detik   | 33  |
| T(x)                          | Suhu udara sebagai fungsi posisi; satuannya °C   | 34  |
| x                             | Posisi atau jarak terhadap acuan (tepi hutan), satuan m  | 34  |
| U(x,t)                        | Fungsi iklim mikro dalam domain waktu dan ruang (dimensi satu)   | 8   |

## DAFTAR ISTILAH

| Istilah   | Deskripsi   |
|---|---|
| Albedo  | Prosentase radiasi matahari yang dipantulkan oleh permukaan bumi terhadap radiasi matahari yang datang/jatuh ke permukaan bumi.   |
| Analisis sensitivitas                               | Studi tentang faktor dan besarnya pengaruh faktor (variabel bebas) terhadap output atau variabel terikat  |
| Celah hutan mangrove                                | Area di dalam atau di batas hutan mangrove dengan pantai, yang terbuka dan dipengaruhi oleh pasut   |
| Difusi termal                                       | Penghantaran energi termal dalam satu medium (misalnya udara) dari posisi yang energinya lebih tinggi ke posisi yang energinya lebih rendah.  |
| Ekotipe hutan mangrove                              | Klasifikasi hutan mangrove berdasarkan kondisi- kondisi ekologis yang mengendalikan pertumbuhan hutan mangrove.   |
| Emisi termal  | Emisi radiasi elektromagnetik dengan puncak radiasinya pada saluran inframerah termal.  |
| Fluks termal  | Kuantitas difusi termal yang melalui satuan penampang tegak lurus terhadap arah difusi termal.  |
| Fragmen hutan                                       | Area hutan yang strukturnya dianggap homogen  |
| Fungsi gradien                                      | Fungsi turunan pertama dari fungsi spasial iklim mikro terhadap jarak   |
| Fungsi spasial                                      | Persamaan matematik yang menghubungkan besaran iklim mikro dengan jarak terhadap acuan (tepi hutan mangrove).   |
| Fungsi temporal                                     | Persamaan matematik yang menyatakan perubahan variabel iklim mikro selama satu hari, pada setiap posisi sepanjang transek.  |
| Garis kesetimbangan termal                          | Garis dalam bidang grafik dinamika harian gradien iklim mikro, yang menyatakan kondisi kesetimbangan antara ekosistem mangrove dengan lingkungan. Garis kesetimbangan termal memiliki nilai gradien tepi sama dengan nol. |
| Gradien tepi  | Nilai fungsi gradien pada posisi $x = 0$ atau tepi hutan mangrove.  |
| Indeks dinamika harian gradien iklim mikro          | Bilangan yang menunjukkan perbandingan luas bidang dinamika gradien malam hari dengan luas bidang dinamika gradien siang hari.  |
| Kedalaman efek tepi                                 | Jarak paling jauh dari tepi ke dalam hutan, yang masih dipengaruhi oleh perubahan variabel iklim mikro lingkungan   |
| Korelasi silang                                     | Ukuran kesamaan ( <i>similarity</i> ) dua fungsi dimana fungsi yang satu mengalami <i>time lag</i> terhadap fungsi lainnya. Korelasi silang dikenal sebagai perkalian titik yang digeser ( <i>sliding dot product</i> ).  |
| Lingkungan berbatasan                               | Area atau fitur ekologis berbatasan dengan hutan mangrove dimana iklim mikro mengalami perubahan mendadak.  |
| Luas bidang dinamika harian gradien iklim mikro     | Luas bidang yang dibatasi kurva dinamika gradien iklim mikro dengan garis kesetimbangan termal  |
| Luas bidang dinamika gradien iklim mikro siang hari | Luas bidang yang dibatasi bagian kurva yang dibentuk oleh gradien tepi iklim mikro selama siang hari.   |



| Istilah  | Deskripsi   |
|--|---|
| Luas bidang dina mika gradien iklim mikro malam hari | Luas bidang yang dibatasi bagian kurva yang dibentuk oleh gradien tepi iklim mikro selama malam hari.   |
| Model matematik                                      | Representasi keadaan atau fenomena iklim mikro dalam hutan mangrove yang dinyatakan dalam simbol dan hubungan matematis   |
| Nilai maksimum                                       | Nilai atau besaran variabel iklim mikro tertinggi sepanjang hari.   |
| Panas sensibel                                       | Energi panas yang dapat dirasakan dan diukur menggunakan thermometer. Energi yang diemisikan ke atmosfer oleh permukaan bumi karena mengalami pemanasan oleh radiasi matahari adalah panas sensibel.                            |
| Panas laten  | Bagian energi radiasi matahari yang dirubah menjadi energi termal dan tersimpan dalam bentuk uap atau digunakan untuk proses fotosintesis dll.  |
| Parameter iklim mikro                                | atau parameter kuantitatif iklim mikro adalah besaran-besaran fisis yang menyatakan kuantitas, perubahan dan perbedaan kuantitas iklim mikro hutan mangrove dengan lingkungan.  |
| Radiasi cahaya                                       | Radiasi elektromagnetik yang mencapai bumi, dengan puncak radiasi pada gelombang tampak mata.   |
| Selisih maksimum tepi – interior                     | selisih tertinggi antara nilai variabel iklim mikro di tepi dengan nilai variabel iklim mikro di dalam hutan (pada jarak kedalaman efek tepi)   |
| Tambalan   | Area hutan mangrove berbatasan dengan hutan mangrove yang berbeda: jenis vegetasi atau usia atau kerapatan kanopi. Penetrasi matahari pada dua tambalan berbatasan berbeda, sehingga memunculkan efek tepi pada kedua tambalan. |
| <i>Time lag</i>                                      | Selisih waktu terjadinya perubahan variabel suhu udara, kelembaban udara, suhu air/tanah dengan perubahan kuat penerangan matahari  |

## BAB I PENDAHULUAN

Hutan mangrove didefinisikan sebagai pepohonan atau belukar yang tumbuh di daerah pasut dari estuaria, delta atau laguna di wilayah tropis atau sub-tropis (Kathiresan dan Bingham, 2001) hingga lintang 30° dari equator (Monteith, 1975; Rosenberget *et al.*, 1985; Wolanski, 2008). Hutan mangrove memiliki tiga fungsi utama yakni: fungsi ekologis, ekonomi dan sosial. Fungsi ekologis antara lain: penyerapan carbon (Snedaker, 1995; Oliveira *et al.*, 2004; Cogliattiet *al.*, 2004), pengendalian iklim regional (Hudspeth *et al.*, 2009; Schahczensky and Hill, 2009), melindungi wilayah pantai dari pengaruh ombak, angin, pasut (Sweeney, 2001; Mazda *et al.*, 2007; Gilman *et al.*, 2006; Hong, 2006) dan intrusi air laut (Ellison and Stoddart, 1991; Kirnak, *et al.*, 2002; Saxena, 2007; Jaykus, *et al.*, 2009), melindungi padang lamun dan terumbu karang (Victor *et al.*, 2004; Gilman *et al.*, 2006; Giesen *et al.*, 2007). Fungsi ekologis penting lainnya ialah sebagai tempat bersarang, pemijahan dan pembesaran berbagai jenis ikan, udang, kerang, burung dan fauna lain (Setyawan, 2002; Gilman *et al.*, 2006; Giesen, *et al.*, 2007; Hudspeth *et al.*, 2009), dimana hutan mangrove sekaligus berperan mengatur mata rantai makanan bagi organisme tersebut (Kaufmann and Thompson, 2005; Giri and Muhlhausen, 2008).

Fungsi ekonominya antara lain: pemanfaatan area hutan mangrove untuk tambak ikan, udang, garam (Bann, 2003; Setiawan dan Winarno, 2006; Hudspeth *et al.*, 2009), dan lokasi wisata (Dixon, 1990; Giesen *et al.*, 2007; Mwaipopo and Lufumbi, 2009). Fungsi ekonomi lainnya ialah pemanfaatan batang mangrove untuk bahan bakar (Ruitenbeek, 2002), bahan konstruksi dan kerajinan (Ruitenbeek, 2002; Gilman *et al.*, 2006). Fungsi sosial antara lain: pemanfaatan sebagai area pemukiman (Giesen *et al.*, 2007), sebagai tempat mencari ikan (Giesen *et al.*, 2007; Hudspeth *et al.*, 2009). Masyarakat tradisional memanfaatkan pohon dan buah mangrove sebagai bahan obat-obatan (Ruitenbeek, 2002; Setiawan dan Winarno, 2006; Gilman *et al.*, 2006). Ekosistem hutan mangrove telah banyak dimanfaatkan sebagai lokasi pendidikan (lingkungan) dan penelitian (Gilman *et al.*, 2006; Giesen *et al.*, 2007).

Multifungsi ekosistem hutan mangrove mendorong berbagai bentuk pemanfaatan yang sering tidak mempertimbangkan keberlanjutan fungsi ekologisnya (Hoffman *et al.*, 2006). Laporan Pemerintah Indonesia menyebutkan sekitar 1 juta ha hutan mangrove lenyap antara tahun 1969 dan 1980 (Anonymous, 2001). Tiga faktor utama penyebab kerusakan mangrove di Indonesia, yaitu (1) pencemaran, (2) konversi hutan mangrove yang kurang memperhatikan faktor lingkungan, dan (3) penebangan berlebihan (Kusmana *et al.*, 2003). Kerusakan mangrove dalam skala besar dan berlangsung cepat, disebabkan oleh konversi area mangrove untuk budidaya perikanan/tambak (Bann, 2003; Mwaipopo and Lufumbi, 2009), pertanian (sawah, perkebunan), jalan raya, industri (Giesen *et al.*, 2007), produksi garam (Setiawan dan Winarno, 2006) dan pemukiman.

Ekosistem mangrove memiliki kondisi iklim mikro tertentu. Pohon mangrove tumbuh di daerah tropis dan sub tropis dengan suhu udara rata-rata 20°C dan rentang fluktuasi maksimum 10°C. Kondisi iklim mikro hutan mangrove yang khas, menunjang kehidupan biota air, satwa dan fauna serta berbagai mikroorganisme (Ridd and Stieglitz, 2002; Wolanski, 2007). Perombakan hutan mangrove menyebabkan perubahan kondisi fisik, termasuk iklim mikro (Mazda and Kamiyama, 2007; Granek dan Ruttenberg, 2008). Perubahan iklim mikro potensial menyebabkan gangguan pertumbuhan hutan mangrove (Snedaker, 1995; Gladstone and Schreider, 2003; Mazda and Kamiyama, 2007), dan fungsi ekologisnya sebagai habitat biota (Drinkwater *et al.*, 2003; Granek and Ruttenberg, 2008; Wolanski, 2008; Luther and Greenberg, 2009). Perubahan yang terjadi pada sistem mangrove, akan diikuti perubahan faktor-faktor abiotik seperti suhu, penyinaran dan pasokan nutrisi yang selanjutnya mempengaruhi faktor biotik seperti produktivitas dan komposisi spesies (Kjerfve, 1990; Granek and Ruttenberg, 2008). Mekanisme adaptasi biologis dalam hutan mangrove, mengikuti fluktuasi harian lingkungan seperti suhu, salinitas, penggenangan

(*inundation*) (Budiman *et al.*, 2002). Multifungsi hutan mangrove dapat dipertahankan apabila kondisi iklim mikro (dan kondisi ekologis lainnya) berada dalam rentang yang memungkinkan pertumbuhan dan kehidupan biota di dalamnya. Pemulihan alamiah hutan mangrove hanya dapat berlangsung dalam rentang iklim mikro tertentu.

Hasil-hasil penelitian membuktikan bahwa iklim mikro merupakan variabel yang sangat peka terhadap perubahan ekosistem hutan (Gradstein, 2008). Variabel-variabel iklim mikro langsung berubah jika terjadi perubahan energi termal dalam hutan dan lingkungan sekitarnya (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. Brosfokske *et al.* (1997) mengemukakan bahwa iklim mikro menjadi pertimbangan penting dalam manajemen ekosistem karena pengaruhnya pada proses dan fungsi ekosistem. Brosfokske *et al.* (1997), Zheng *et al.* (2000) dan Iverson and Hutchinson (2002) melakukan penelitian (karakterisasi) iklim mikro hutan sebagai acuan dalam pengelolaan hutan. Iklim mikro hutan mangrove sangat peka terhadap perubahan struktur hutan mangrove (Bjorkman *et al.*, 1988; Field, 1995; Gladstone and Schreider, 2003). 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.

Penelitian iklim mikro hutan di daratan telah banyak dilakukan sejak lama, sedangkan penelitian iklim mikro hutan mangrove belum banyak dilakukan. Penelitian di hutan mangrove lebih banyak pada aspek biologi, sedangkan proses-proses fisis, jarang diteliti (Wolanski, 2008). Penelitian proses fisis lebih ditekankan pada hidrodinamika mangrove, sedangkan berkaitan dengan variabel penyinaran matahari, suhu udara, kelembaban udara, kecepatan angin, dan suhu tanah, belum banyak dilakukan (Krauss *et al.*, 2008). 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 spesies (Wang *et al.*, 2004; Dahdouh-Guebas *et al.*, 2005), dan perubahan tutupan mangrove karena perombakan atau 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. Beberapa pakar, antara lain Wattayakorn *et al.* (1990), Mazda *et al.* (1990), Mederios and Kjervfe (1993), 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.

Perubahan harian iklim mikro merupakan proses fisis dimulai dari penyinaran matahari, absorpsi energi cahaya oleh komponen ekosistem hutan dan lingkungan berbatasan, perubahan energi cahaya yang diserap menjadi energi termal (panas laten dan panas sensibel), emisi radiasi termal, dan difusi termal antara komponen ekosistem dan antara ekosistem hutan dengan lingkungan (Ball and Critchley, 1982; Black *et al.*, 1991; Malanson and Carins, 1995; Moore *et al.*, 2005). Proses fisis tersebut berlaku sama untuk ekosistem hutan maupun hutan mangrove. Penelitian iklim mikro untuk karakterisasi hutan mangrove dapat mengadaptasi dan mengembangkan metode penelitian iklim mikro hutan. Variabel iklim mikro hutan yang dikaji peneliti terdahulu adalah: intensitas cahaya atau kuat penerangan

matahari, suhu udara, kelembaban udara (Godefroid *et al.*, 2006; Hennenberg *et al.*, 2008), kecepatan angin, suhu tanah, dan kelembaban tanah (Chen *et al.*, 1995; Davies-Colley *et al.*, 2000). Tujuan penelitian, menentukan banyaknya variabel iklim mikro yang diteliti (Davies-Colley *et al.*, 2000). Parameter yang digunakan peneliti sebelumnya untuk mendeskripsikan perubahan temporal dan variasi spasial iklim mikro hutan, adalah pola perubahan temporal (harian) dan variasi spasial variabel iklim mikro (Ashton, 1992; Spittlehouse *et al.*, 2004; Rambo and North, 2008), gradien (Chen *et al.*, 1995; Dong *et al.*, 1998; Davies-Colley *et al.*, 2000) dan kedalaman efek tepi (Dignan and Bren, 2003; Fletcher, 2005; Heithecker and Halpern, 2007; Broadbent *et al.*, 2008). Buku ini membahas iklim mikro hutan mangrove, metode pengukuran iklim mikro dan hasil-hasil penelitian iklim mikro hutan mangrove. Buku ini dapat dijadikan bahan bacaan atau referensi perkuliahan dan penelitian mahasiswa dan dosen bidang studi terkait seperti Fisika dan Pendidikan Fisika, Biologi dan Pendidikan Biologi, Kehutanan, Perikanan dan Kelautan, Geografi dll.

## BAB II IKLIM MIKRO EKOSISTEM HUTAN MANGROVE

### 2.7. Ekosistem Hutan Mangrove

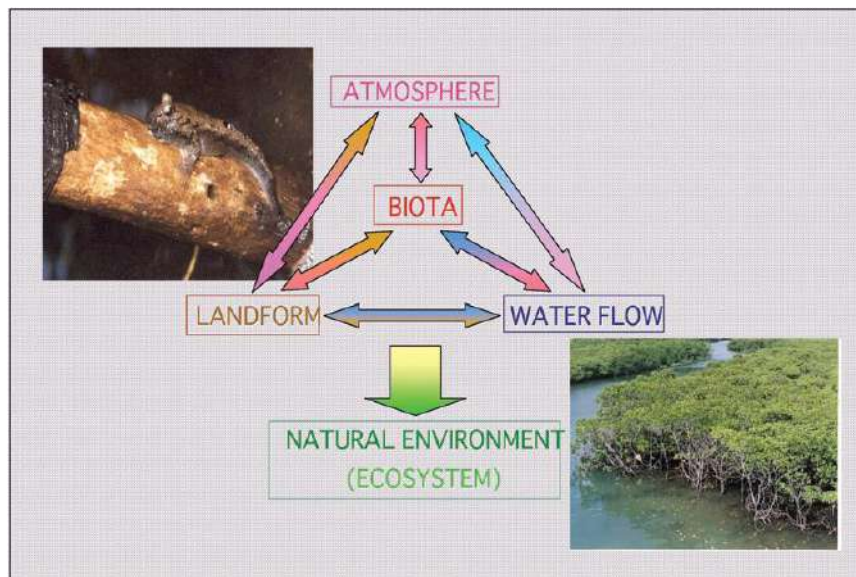
Giesen *et al.* (2007) mendefinisikan mangrove sebagai tumbuhan yang terdapat di daerah pasang surut. Beberapa penulis seperti MacNae (1968), Chapman (1977), Ogino & Chihara (1988), menyebut tumbuhan tersebut sebagai “*mangal*”. Penyebutan mangrove secara luas digunakan untuk tipe vegetasi yang bertumbuh di antara batas pasang surut terendah hingga tertinggi (Kusmana *et al.*, 2003). Hutan mangrove umumnya bertumbuh pada suhu di atas 20°C dengan rentang suhu musiman tidak melebihi 10°C. Fluktuasi suhu 5°C merupakan batas ideal pertumbuhan mangrove (Giesen *et al.*, 2007).

Spesies mangrove yang ada di dunia berkisar 80 spesies (Saenger, 1998) dan Asia Tenggara memiliki keragaman mangrove yang sangat tinggi (Giesen *et al.*, 2007). Spesies utama yang biasanya ditemukan di wilayah tropis dan sub tropis ialah *Rhizophora mucronata*, *Ceriops tagal*, dan *Bruguiera gymnorhiza*. Spesies lainnya meliputi *Avicennia marina*, *Avicennia officinalis*, *Heritiera littoralis*, *Lumnitzera racemosa*, *Sonneratia alba*, *Xylocarpus granatum* dan *Xylocarpus moluccensis* (Giesen *et al.*, 2007). Hutan mangrove membutuhkan kondisi fisis ideal untuk pertumbuhannya. Hutan mangrove sensitif terhadap perubahan fisis di lingkungan sekitarnya

Ekosistem mangrove dipengaruhi oleh unsur-unsur lingkungan dari laut, darat dan atmosfer. Pengaruh laut antara lain ombak dan arus yang berfungsi mengangkut atau mengendapkan material di bawah perakaran mangrove (Wolanski, 1992; Medeiros and Kjerfve, 1993; Mazda *et al.*, 2005), dan menyebabkan variasi salinitas (Ridd and Stieglitz, 2002; Kobashi and Mazda, 2005). Faktor darat antara lain pasokan lumpur dan air segar (Duke and Wolanski, 2001). Faktor atmosfer antara lain penyinaran matahari, angin, hujan, evaporasi dan evapotranspirasi, suhu udara, kelembaban udara (Clough and Sim, 1989; Kjerfve, 1990). Interaksi faktor laut, daratan, dan atmosfer menentukan proses biologis dalam ekosistem mangrove (Coccosis, 2001). Proses fisis dan biologis memasok kebutuhan biota (insekta, reptile, hewan amfibi, burung-burung dan berbagai mikroorganisme perairan) dalam ekosistem tersebut (Johannes, 1982; Drinkwater *et al.*, 2003; Ellison, 2005; Hong, 2006). Mazda *et al.* (2007) menyajikan secara skematis interaksi antara faktor atmosfer, bentuk lahan, aliran air (laut dan sungai), dan peran biota dalam ekosistem mangrove seperti Gambar 2.1.

Para ahli seperti Lugo and Snedaker (1974) yang dikutip Kathiresan (2004), mengklasifikasi hutan mangrove berdasarkan bentang alam dan variasi kondisi ekologis. Klasifikasi ini dikenal sebagai ekotipe hutan mangrove, meliputi :

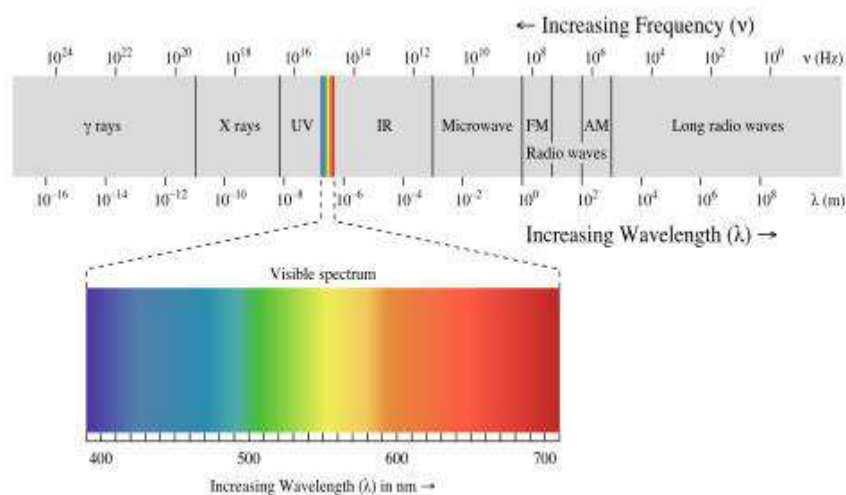
- a. *Overwash mangrove forests*: ialah pulau kecil yang terbentuk dari mangrove (*small mangrove islands*), yang selalu mengalami pencucian material oleh pasut.
- b. *Fringe mangrove forests*: ialah tipe mangrove yang bertumbuh sepanjang garis pantai yang terlindungi, dipengaruhi oleh pasut harian. Tipe mangrove ini peka terhadap erosi oleh turbulensi gelombang dan pasut.
- c. *Riverine mangrove forests*: ialah tipe hutan mangrove yang bertumbuh sepanjang tepi alur sungai, setiap hari tergenangi pasut. Tipe mangrove ini mendapat pasokan nutrisi dari sungai, menyebabkan sistem pepohonannya produktif dan tinggi.
- d. *Basin mangrove forests*: ialah 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.
- e. *Hammock mangrove forests*: tipe mangrove ini mirip dengan tipe basin tapi terletak lebih tinggi dari keempat tipe mangrove tersebut di atas.
- f. *Scrub mangrove forests*: ialah mangrove berukuran kerdil (*dwarf mangrove*) yang bertumbuh sepanjang tepi pantai.



Gambar 2.1. Skema ekosistem (umpan-balik antar komponen) mangrove (sumber: Mazda *et al.*, 2007)

## 2.8. Radiasi Matahari dan Difusi Termal dalam Ekosistem Hutan

Perubahan harian iklim mikro hutan (termasuk hutan mangrove) merupakan rangkaian proses fisis mulai dari penyinaran matahari, absorpsi energi cahaya oleh komponen ekosistem hutan dan lingkungan, perubahan energi cahaya menjadi panas laten dan panas sensibel, emisi termal, dan difusi termal antar komponen ekosistem dan antara lingkungan dengan ekosistem hutan. Matahari sebagai sumber energi memancarkan energi dalam spektrum elektromagnetik yang sangat lebar mulai dari spektrum sinar gamma (panjang gelombang terpendek, frekwensi tertinggi) hingga spektrum gelombang radio (panjang gelombang terpanjang, frekwensi terendah) (Gambar2.2).



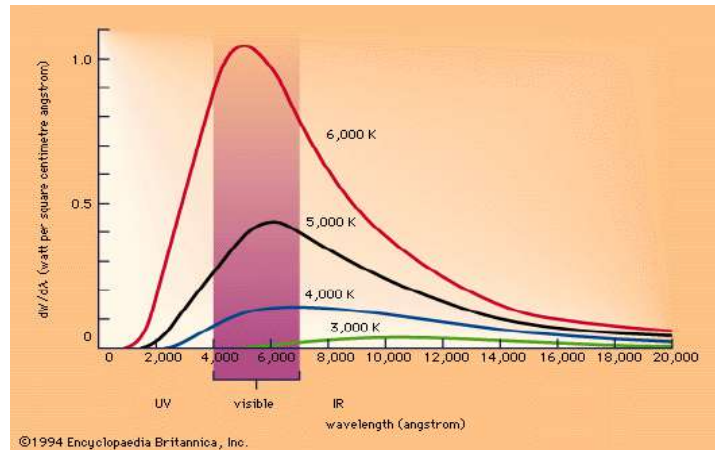
Gambar2.2. Spektrum radiasi elektromagnetik (sumber: Wikipedia Indonesia)

Radiasi matahari yang mencapai bumi dan dikenal sebagai radiasi cahaya, pada dasarnya adalah radiasi kontinum yang meliputi seluruh spektrum, namun puncak radiasinya terletak pada saluran tampak mata. Matahari dipandang sebagai benda hitam yakni benda yang menyerap dan mengemis radiasi elektromagnetik secara sempurna. Besaran energi yang dipancarkan benda hitam dirumuskan oleh Plank dan dikenal sebagai hukum radiasi

Plank (*Plank radiation law*). Puncak radiasi energi oleh benda hitam bergantung pada suhu benda hitam, menurut hubungan

$$\lambda = 3 \times 10^7 / T \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana  $\lambda$  adalah panjang gelombang puncak radiasi, T adalah suhu mutlak benda hitam. Gambar2.3 memperlihatkan kurva radiasi benda hitam untuk beberapa nilai suhu mutlak (T).



Gambar2.3. Kurva radiasi benda hitam (sumber: Encyclopedia Britanica).

Persamaan (2.1) dan kurva radiasi menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu benda hitam, puncak radiasi bergeser ke kiri (panjang gelombang lebih pendek, frekwensi lebih tinggi). Hubungan suhu dengan pergeseran puncak radiasi ini dikenal sebagai hukum Wien. Persamaan (2.1) menunjukkan bahwa puncak radiasi matahari terletak pada spektrum tampak mata atau spektrum cahaya, karena suhu mutlak matahari berkisar 6000 K. Obyek dipermukaan bumi dengan suhu sekitar 300 K, memancarkan radiasi dengan puncaknya pada spektrum infra-merah termal, sehingga dikenal sebagai radiasi termal. Besarnya energi yang dipancarkan benda hitam berbanding lurus dengan pangkat empat suhu mutlak benda:

$$E = s \cdot T^4 \dots\dots\dots(2.2)$$

Persamaan (2.2) dikenal sebagai hukum Stefan-Boltzmaan. E adalah energi total radiasi, s adalah tetapan Boltzmann yang nilainya  $s = 5.67 \times 10^{-8}$  Joule/(m<sup>2</sup>sec.K<sup>4</sup>).

Energi radiasi cahaya yang dipancarkan matahari, jauh lebih besar dari energi yang dapat dipancarkann oleh permukaan bumi. Absorpsi sebagian radiasi matahari, yang dirubah menjadi panas laten dan panas sensibel, memungkinkan obyek yang ada dipermukaan bumi mengemisi radiasi dengan puncaknya di sekitar spektrum infra-merah termal. Hubungan antara energi radiasi matahari yang diterima dengan perubahan energi obyek yang ada di permukaan bumi (misalnya ekosistem hutan), mengikuti hukum kesetimbangan energi :

$$R_n + H + S + LE + PS + M = 0 \dots\dots\dots(2.3)$$

dimana

- R<sub>n</sub> = radiasi neto (*net radiation*),
- S = fluks panas permukaan (tanah, air, dll.),
- H = fluks panas sensibel (*sensible heat fluks*),
- LE = fluks panas laten (*latent heat fluks*),
- PS dan M masing-masing adalah energi untuk fotosintesa dan bagian energi yang dirubah kebentuk lainnya (Campbell, 1977).

Persamaan (2.3) menunjukkan bahwa energi radiasi matahari (puncak radiasi pada spektrum tampak mata) yang jatuh dan diserap obyek ( $R_n$ ) di permukaan bumi, dirubah menjadi berbagai bentuk energi. Kuantitas energi termal, bergantung pada kuantitas energi cahaya yang diserap; semakin banyak energi radiasi matahari yang diserap, fluks panas permukaan ( $S$ ), fluks panas sensibel ( $H$ ), dan bentuk energi lainnya semakin meningkat. Akumulasi energi yang diserap, meningkatkan panas sensibel obyek ( $H$ ), dan pada nilai suhu tertentu ( $T$ ), obyek mulai mengemisi radiasi termal (Persamaan (2.2)), sehingga terjadi peningkatan fluks termal ( $S$ ). Perubahan kuantitas energi yang diterima dari matahari sepanjang hari, menyebabkan perubahan  $H$  dan  $S$  (dan bentuk energi lainnya). Perubahan  $H$  dan  $S$  menyebabkan perubahan iklim mikro ekosistem (hutan, hutan mangrove dll).

Difusi termal yang menyebabkan perubahan iklim mikro dapat dijelaskan dengan contoh difusi termal udara di bawah kanopi. Fluks panas sensibel didefinisikan sebagai gradien temperature dibagi tahanan udara (*aerial resistance*) pada aliran panas sensibel atau :

$$H = \rho_a C_p (T_a - T_s) / r_a \dots\dots\dots(2.4)$$

dimana,

- $H$  = fluks panas,
- $\rho_a$  = kerapatan udara,
- $C_p$  = panas jenis udara pada tekanan konstan,
- $T_a$  dan  $T_s$  masing-masing adalah suhu udara dan suhu permukaan tanah,
- $r_a$  = resistansi pada aliran panas sensibel.

Persamaan (2.4) menunjukkan fluks panas pada arah 7ertical, mengalir dari lapisan atas yang suhunya lebih tinggi ( $T_a$ ) ke lapisan permukaan yang suhunya lebih rendah ( $T_s$ ). Persamaan(2.4) berlaku juga untuk difusi termal udara dalam arah horizontal, misalnya dari lingkungan terbuka ke dalam hutan. Persamaan(2.4) menunjukkan bahwa fluks panas sensibel akan meningkat jika resistansi udara berkurang. Resistansi udara berkurang jika kerapatan udara berkurang (udara menjadi lebih renggang karena menjadi lebih panas) (Monteith, 1975; Rosenberg *et al.*, 1985). Perubahan resistansi termal menyebabkan penetrasi termal (arah horizontal) dari lingkungan ke dalam hutan semakin bertambah. Penetrasi difusi termal juga semakin bertambah dari pagi hingga siang hari, karena peningkatan intensitas radiasi cahaya yang diterima permukaan bumi.

Aliran fluks termal, dibedakan atas: (1) aliran tertekan (*forced convection*) yakni aliran yang dipengaruhi gaya mekanik, gesekan fluida, atau gaya eksternal seperti angin, dan (2) aliran bebas (*free convection*) ialah aliran energi yang semata-mata disebabkan oleh perbedaan energi termal fluida (udara). Kedua kategori aliran energi ini penting dalam kajian perubahan harian iklim mikro ekosistem hutan (Monteith, 1973; Rosenberg *et al.*, 1985).Difusivitas termal adalah ukuran tanggapan obyek atau bahan terhadap fluks termal yang melaluinya. Bahan dengan difusivitas tinggi mendifusikan energi termal dengan baik dan cepat ke dalamnya, sedangkan bahan dengan difusivitas termal rendah mendifusikan energi termal lebih lambat. Fluks termal akan mengalir terus melewati batas medium atau habitat (misalnya antara tempat terbuka dengan hutan), dan berhenti apabila terjadi kesetimbangan termal antara medium berbatasan. Persamaan difusi termal berbentuk Persamaan diferensial parsial :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \kappa \cdot \nabla^2 u \dots\dots\dots(2.5)$$

$u$  adalah kuantitas termal,  $\frac{\partial u}{\partial t}$  adalah laju difusi termal,  $\kappa$  adalah koefisien difusi medium,  $\nabla$  adalah operator vektor ( $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$ ).Persamaan difusi termal (Persamaan (2-5)) menunjukkan bahwa kuantitas termal  $u$  berubah menurut ruang dan waktu(Fritz, 1991;



Evans, 1998; Carslaw and Jaeger (1959) dalam Beltrami and Kellman (2003)). Persamaan difusi termal dalam ekosistem hutan antara lain dijelaskan dalam penelitian: Calogine *et al.* (1998), Alvala *et al.* (2002), Oliphant *et al.* (2004), Wang *et al.* (2011). Proses difusi seperti ini berlaku juga untuk difusi energi radiasi matahari pada saluran tampak mata (Rich *et al.*, 1993; Jennings *et al.*, 1998; Lieffers, 1999; Hale, 2003; North *et al.*, 2008), dan difusi spesies biota dalam habitat tepi (Fagan *et al.*, 1999). Persamaan (2.5) adalah bentuk difusi termal dalam ruang (dimensi tiga). Difusi horizontal memotong tepi hutan merupakan bentuk difusi berdimensi satu dan jika diasumsikan tidak ada variasi termal pada arah sejajar tepi hutan, maka Persamaan (2.5) dapat disederhanakan menjadi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \dots\dots\dots(2-6)$$

Solusi umum Persamaan(2-6) adalah

$$U(x,t) = e^{-kt/\lambda^2} [D \cdot \cos\left(\frac{x}{\lambda}\right) + E \cdot \sin\left(\frac{x}{\lambda}\right)] \dots\dots\dots(2-7)$$

dimana  $\lambda$  adalah konstanta yang satuannya adalah satuan panjang, D dan E masing-masing adalah konstanta integrasi. Solusi khusus Persamaan diferensial (2-6), membutuhkan data syarat batas dan syarat awal. Persamaan (2-7) menunjukkan bahwa difusi termal dari sumber energi ke posisi berjarak x melalui medium (misalnya udara) berbentuk vibrasi energi karena proses tumbukan antar partikel udara yang merambatkan energi sepanjang jarak x. Persamaan (2-7) juga menunjukkan bahwa kuantitas termal u mengalami penurunan secara eksponensial menurut waktu, karena penyerapan energi termal oleh medium sekitar. Difusi termal arah horizontal sepanjang transek memotong batas ekosistem dapat menggunakan Persamaan (2-6), dengan asumsi bahwa fluks termal tidak bervariasi pada arah sejajar tepi hutan, dan hanya berubah sepanjang transek tepi – interior hutan. Asumsi ini menjadi dasar untuk pemodelan dinamika dan variasi spasial difusi iklim mikro sepanjang transek memotong batas ekosistem.

Difusi energi termal dalam alam dikendalikan oleh radiasi matahari, yang intensitasnya berubah secara sinusoidal. Perubahan kuantitas energi yang diterima, menyebabkan perubahan kuantitas energi sepanjang transek (u(x)) yang berbentuk sinusoidal. Difusi termal dari posisi yang energinya lebih tinggi ke posisi yang energinya lebih rendah untuk waktu t tertentu, berbentuk fungsi eksponensial negatif. Bentuk umum solusi Persamaan difusi termal, bersesuaian dengan pola perubahan temporal variabel suhu udara, suhu tanah, kelembaban udara, kelembaban tanah dalam hutan, seperti ditunjukkan oleh hasil penelitian English *et al.* (1989), Chen *et al.* (1993b); Davies-Colley *et al.* (2000), Kora *et al.* (2005).

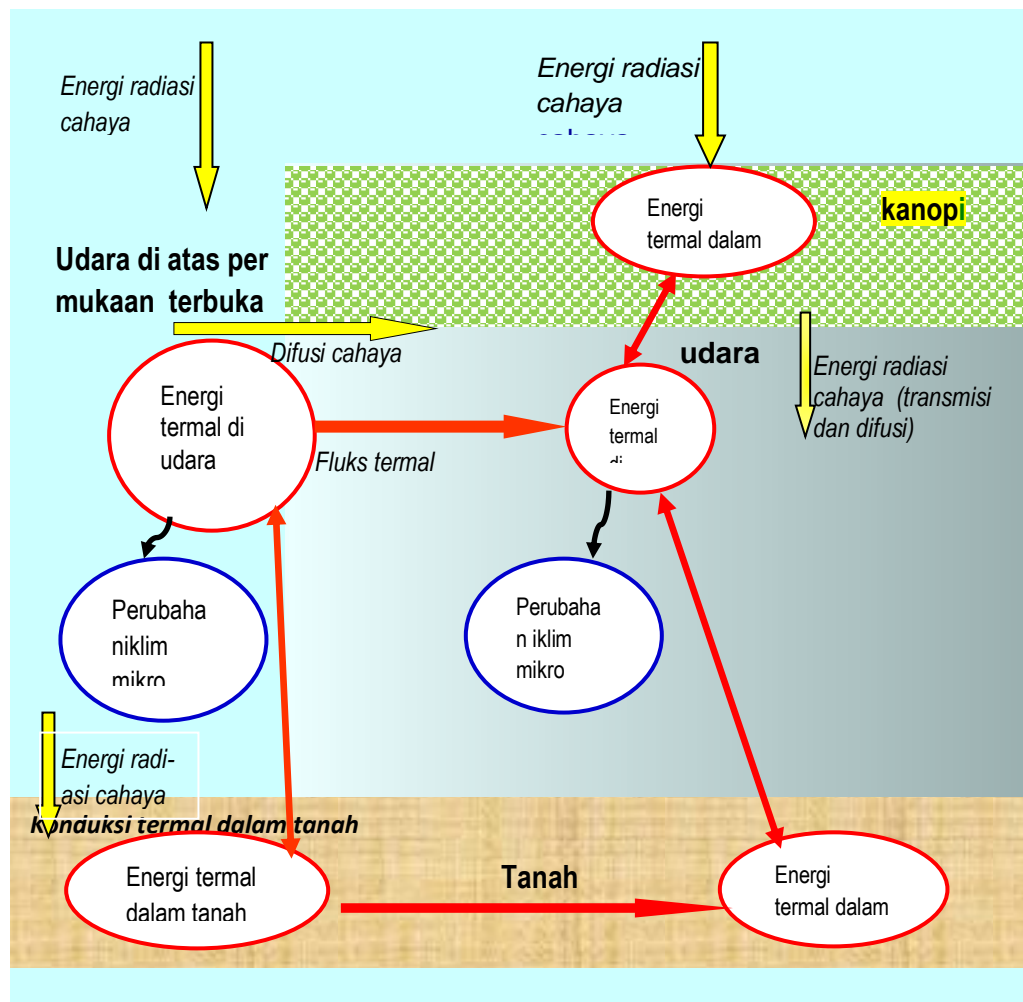
## 2.9. Iklim Mikro Hutan

Iklim mikro didefinisikan sebagai kondisi iklim pada satu area yang terlokalisir, diukur dekat permukaan bumi (Geiger, 1965 dalam Chen *et al.*, 1999). Oke (1978), dalam Davies-Colley *et al.* (2000) 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. Ogunsote and Prucnal-Ogunsote (2002), mengemukakan bahwa iklim mikro menunjuk pada area dengan skala spasial 1 km horizontal, dan 100 meter vertikal. Iklim mikro dipengaruhi oleh bangunan, pohon dan pola aliran angin. Iklim mikro dikendalikan oleh radiasi matahari sebagai sumber energi cahaya yang diterima permukaan bumi, dan sebagiannya menjadi energi termal oleh fitur-fitur ekologis lokal. Iklim mikro merupakan bagian dari iklim global; iklim mikro dipengaruhi oleh iklim global, dan sebaliknya iklim global ditentukan oleh iklim mikro. 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 dipengaruhi oleh struktur vegetasi dan tutupan kanopi. Tutupan kanopi mereduksi radiasi matahari, presipitasi dan kecepatan angin (*Moore et al.*, 2005). Kanopi hutan mengubah distribusi spektral 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, kerapatan, dan susunan daun (*Federer*, 1971; *Black et al.*, 1991).

### 2.9.1. Skema difusi energi cahaya dan energi termal, dan perubahan iklim mikro hutan.

Hasil-hasil penelitian membuktikan bahwa variabel-variabel iklim mikro dalam ekosistem hutan berfluktuasi secara periodik dengan periode 24 jam (*Chen et al.*, 1999; *Davies Colley et al.*, 2000), kecuali intensitas radiasi cahaya yang periodenya 12 jam. Pola perubahan variabel iklim mikro berbentuk periodik sinusoidal, walaupun terdapat fluktuasi akibat perubahan cuaca (*Chen et al.* 1993; *Davies-Colley et al.*, 2000).



Gambar2.4. Skema difusi radiasi tampak mata dan difusi termal serta pengaruhnya terhadap perubahan iklim mikro ekosistem hutan dan lingkungan (dikembangkan peneliti berdasar kan kajian pustaka).

Pola perubahan ini disebabkan oleh faktor utama yang mengendalikan iklim mikro adalah energi radiasi matahari yang diterima permukaan bumi (*Malanson and Carins*, 1995;

Moore *et al.*, 2005). Proses difusi radiasi cahaya dan difusi termal yang terjadi di permukaan bumi dan pengaruhnya terhadap iklim mikro, secara skematik disajikan pada Gambar 2.4. Radiasi matahari yang jatuh ke permukaan bumi, sebagian dipantulkan sebagai albedo, dan sebagiannya diserap kemudian dirubah menjadi energi panas laten, energi panas sensibel, dan bentuk energi lainnya (Persamaan (2.3)). 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 obyek di permukaan bumi, dan pada suhu sekitar 300 K ( $\pm 27$  °C), obyek di permukaan bumi memancarkan radiasi termal (Persamaan (2.1)). Radiasi termal yang dipancarkan bersifat kontinum dalam spektrum radiasi elektromagnetik, dengan puncak radiasi berada pada spektrum inframerah termal (Persamaan (2.1)). Perbedaan kapasitas panas jenis dan kerapatan massa obyek atau benda, menyebabkan perbedaan penyerapan energi cahaya dan komponen yang diubah menjadi energi termal (Persamaan (2.2)). Perbedaan emisi termal menyebabkan aliran fluks termal antar komponen ekosistem hutan, misalnya antara udara dengan tanah (Beltrami and Kellman, 2003; Mihailovic *et al.*, 2004), atau antara ekosistem hutan dengan lingkungan. Perubahan difusi termal (kuantitas dan arahnya) terukur melalui variabel iklim mikro hutan.

### 2.9.2. Variabel 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. Davies-Colley *et al.* (2000) mengemukakan bahwa paling tidak ada lima variabel yang secara bersama-sama mengkarakterisasi iklim mikro hutan yakni: penetrasi cahaya matahari, penetrasi angin, presipitasi (curah hujan), suhu (tanah dan udara), kelembaban (tanah dan udara). Newmark (2001), Godefroid *et al.* (2006), dan Hennenberg *et al.* (2008), mengemukakan bahwa variabel 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. Penelitian perubahan harian dan musiman gradien iklim mikro arah vertikal dan horizontal oleh Rambo and North (2008), dilakukan dengan 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. Variabel-variabel iklim mikro yang digunakan untuk mengkarakterisasi ekosistem hutan, dapat digunakan untuk karakterisasi ekosistem hutan mangrove. Perubahan iklim mikro harian merupakan rangkaian proses fisis, mulai dari penyinaran hingga difusi termal, yang berlaku sama pada semua ekosistem (hutan, hutan mangrove, area pemukiman dll).

### 2.9.3. Pentingnya penelitian iklim mikro hutan mangrove

Variabel 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 (Morrisey *et al.*, 2007; Gradstein, 2008). Beberapa ahli, antara lain Wattayakorn *et al.* (1990), Mazda *et al.* (1990), Mederios and Kjervfe (1993), Ridd and Stieglitz (2002), dan Krauss *et al.*, (2008), 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

Kondisi ekosistem hutan mangrove berbeda dengan hutan di daratan, namun studi tentang karakterisasi iklim mikro hutan mangrove dapat mengadopsi studi karakteristik iklim mikro ekosistem hutan. Perubahan harian iklim mikro dalam hutan mangrove merepresentasikan proses fisis yang sama dengan yang terjadi pada hutan di daratan. Perbedaan iklim mikro hutan dengan hutan mangrove disebabkan oleh faktor ekosistem dan lingkungan berbatasan, yang menjadi obyek penelitian karakterisasi iklim mikro hutan dan hutan mangrove. Beberapa studi yang menunjukkan pentingnya karakterisasi iklim mikro ekosistem hutan antara lain:

- a. Variabel iklim mikro sebagai indikator energi cahaya dan energi termal dalam hutan dan lingkungan. 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. Pola perubahan iklim mikro sangat erat hubungannya dengan pengaruh difusi termal di udara antara ekosistem hutan dengan lingkungan berbatasan (Godefroid *et al.*, 2006). Difusi termal antara ekosistem hutan dengan lingkungan berbatasan dibuktikan oleh perubahan harian gradien iklim mikro (suhu udara, defisit tekanan uap air, dan kecepatan angin) (Pohlman *et al.*, 2009)

Banyak peneliti menyatakan bahwa iklim mikro mempengaruhi proses biotik-abiotik dalam hutan, yang sebenarnya tidak lain adalah pengaruh kecukupan atau kelebihan energi cahaya dan energi termal dalam ekosistem hutan. Peningkatan radiasi masuk dan emisi termal melebihi daya tampung ekosistem hutan, berpotensi menyebabkan gangguan alamiah pada vegetasi dan organisme dalam hutan (Meyer *et al.*, 2001). Persyaratan suhu udara tidak kurang dari 20 °C untuk pertumbuhan hutan mangrove (Tomlison, 1986; Kao *et al.*, 2004; Stevens *et al.*, 2006; Stuart *et al.*, 2007), mencerminkan kebutuhan energi termal yang terukur pada besaran dan rentang suhu udara.

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; Malanson and Carins, 1995; 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 variasi 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 tambalan (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 variabel iklim mikro.

- b. Iklim mikro sebagai indikator struktur dan perubahan struktur hutan. 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). Perubahan yang terjadi pada bagian tepi hutan secara signifikan mempengaruhi aliran dan pertukaran energi, material dan spesies sepanjang tepi hutan yang mengalami perubahan (Chen *et al.*, 1993; Malanson and Carins, 1995). Banyak fitur-fitur ekologis dekat tepi, seperti stok dan regenerasi pohon, dan dekomposisi kayu, berhubungan dengan iklim mikro (Chen *et al.*, 1995).

Fluktuasi harian variabel-variabel iklim mikro seperti suhu tanah, suhu udara lebih besar pada lahan terbuka dibanding pada lahan 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 yang besar, 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.*, 1993a; Davies Colley *et al.*, 2000). Penelitian yang dilakukan oleh Chen and Franklin (1997), Xu *et al.* (1997), 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.

Perubahan struktur hutan atau struktur kanopi secara langsung mengubah penerimaan energi matahari dan difusi termal antar komponen ekosistem dan antara ekosistem hutan dengan lingkungan. Perombakan hutan memper-sempit area hutan yang berfungsi mereduksi difusi termal dari lingkungan sekitar, sekaligus memunculkan sumber-sumber energi termal baru, dan meningkatkan energi termal dalam hutan. Duke (2001) dan Alongi and de Carvalho (2008) mengemukakan bahwa celah antar kanopi atau pohon menyebabkan peningkatan cahaya dan suhu, meningkatkan laju evaporasi dan transpirasi. Perombakan hutan menciptakan area terbuka, dan perampangan area hutan dapat meningkatkan penyinaran (Drever and Lertzman, 2003) dan pengaruh difusi termal horizontal terhadap perubahan variabel iklim mikro (Anderson *et al.*, 2007). Perubahan tingkat penyinaran, menyebabkan perubahan keseimbangan energi radiasi matahari dalam ekosistem (Aussenac, 2000).

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). Perombakan hutan meningkatkan penetrasi radiasi matahari di bawah kanopi, sehingga menurunkan perbedaan intensitas radiasi puncak antara hutan dengan lingkungan terbuka (Zheng *et al.*, 2000; Keller, 2005; Tamatamah, 2007). Peningkatan penetrasi radiasi matahari di bawah kanopi juga menyebabkan penurunan perbedaan suhu udara luar dengan suhu udara di bawah kanopi (Zheng *et al.*, 2000; Keller, 2005; Tamatamah, 2007). Perombakan hutan dan kerusakan kanopi menyebabkan perubahan jangka pendek dan jangka panjang iklim mikro hutan (Keller 2005). Perbedaan intensitas radiasi atau kuat penerangan, 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; Pohlman *et al.*, 2007; Mazda and Wolanski, 2009). Kebanyakan hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu udara dalam hutan lebih rendah pada siang hari dan lebih tinggi pada malam hari daripada suhu udara di tempat terbuka dan di tepi hutan (Chen *et al.*, 1995; Davies-Colley *et al.*, 2000; Spittlehouse *et al.*, 2004). Hasil penelitian Kompeneers (1978) yang dikutip Godefroid and Koedam (2003), menunjukkan bahwa suhu udara di lingkungan pemukiman yang

padat, lebih tinggi daripada suhu udara dalam hutan, siang maupun malam hari. 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 terhadap iklim mikro teridentifikasi sama dengan yang terjadi di hutan. Pembabatan pohon mangrove menyebabkan kenaikan suhu tanah sebesar 13°C, suhu udara 11°C, dan salinitas 52 psu pada musim kering (Hernandez 2011). Para peneliti, antara lain Smith *et al.* (1994), Fromard *et al.* (1998); Twilley *et al.* (1999), Duke (2001), dan Berger *et al.* (2008) mengemukakan bahwa penetrasi cahaya ke bawah kanopi mangrove meningkatkan energi termal, dan mempengaruhi struktur dan fungsi hutan mangrove.

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. Iklim mikro menjadi pertimbangan penting dalam manajemen ekosistem karena pengaruhnya pada proses dan fungsi ekosistem (Brosofske *et al.*, 1997). Chen *et al.* (1999), mengemukakan bahwa informasi iklim mikro sangat penting untuk studi lapangan, pemodelan teoritik, dan pengambilan kebijakan manajemen sumberdaya. Penelitian dan karakterisasi iklim mikro hutan, dibutuhkan untuk menghasilkan data yang dijadikan acuan pengelolaan hutan (Brosofske *et al.*, 1997; Zheng *et al.*, 2000; Iverson and Hutchinson, 2002).

- c. Iklim mikro sebagai indikator pengaruh perubahan energi cahaya dan energi termal terhadap perubahan ekosistem hutan dan hutan mangrove. Davies-Colley *et al.* (2000) mengemukakan bahwa kondisi iklim mikro sangat kuat mempengaruhi proses-proses ekosistem. Perubahan besaran iklim mikro di sekitar tepi hutan, secara dramatis diikuti perubahan struktur dan fungsi ekosistem (Murcia, 1995; Matlack and Litvaitis, 1999). 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 mencegah penguapan air dari daun, dan mengendalikan udara di bawah kanopi, sebagai tipikal hutan yang rapat. Banyak fitur ekologis sekitar tepi hutan bergantung pada kondisi iklim mikro yang unik (Edmond and Bigger (1984) dalam Chen *et al.* (1993)). Laju dekomposisi material di sekitar tepi, dipengaruhi oleh fluktuasi kelembaban dan suhu tanah yang mempercepat aktivitas fungi dan organisme dekomposer lainnya. 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.

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; Laurance, 2008). Perubahan alamiah fungsi ekosistem dan bentang alam, sebenarnya dipengaruhi oleh pasokan energi termal dari luar dan dari dalam ekosistem itu sendiri (transfer energi radiasi cahaya menjadi energi

termal). Perubahan energi termal terukur pada perubahan variabel iklim mikro. Meyer *et al* (2001) mengemukakan hal yang sama, bahwa perubahan iklim mikro memberi dampak pada proses ekologis kunci.

Ekosistem mangrove dipengaruhi oleh elemen-elemen atmosferik seperti radiasi matahari, angin, hujan, evaporasi, evapotranspirasi, suhu udara, dan kelembaban udara (Kjerfve, 1990; Wolanski, 2008). 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). Angin sangat besar pengaruhnya pada pohon yang bertumbuh di batas laut dengan daratan, dibanding pohon yang berada di daratan (Campbell, 1998; Yoko-o and Tokeshi, 2011). 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). Peningkatan penetrasi cahaya yang menyebabkan peningkatan energi termal, sangat kuat mempengaruhi struktur dan fungsi hutan mangrove (Smith *et al.* 1994; Doyle *et al.*, 1995; Lugo, 2000; Baldwin *et al.*, 2001; Berger *et al.*, 2008).

- d. Iklim mikro sebagai indikator difusi spesies biota dalam hutan dan hutan mangrove. Pengaruh penyinaran terhadap difusi energi termal dalam ekosistem hutan dan hutan mangrove, diikuti oleh difusi spesies biota dalam habitat tepi. Kesesuaian Persamaan difusi termal dengan difusi spesies biota (Fagan *et al.*, 1999), membuktikan bahwa pergerakan spesies biota dalam habitat tepi hutan, mengikuti aliran fluks termal (udara, air). Pengaruh fluks termal yang terukur pada variabel iklim mikro, terhadap keberadaan dan sebaran spesies dalam hutan dibuktikan oleh penelitian berikut ini. Kerapatan spesies hewan di sekitar tepi atau batas habitat, sangat signifikan dipengaruhi oleh iklim mikro (Haynes and Cronin, 2006). Kondisi iklim mikro hutan berkaitan dengan arsitektur hutan dan secara signifikan mempengaruhi kehidupan biota di dalamnya (Raghu *et al.*, 2004). Brososke *et al.* (1997), Chen *et al.* (1999), Godefroid *et al.* (2007), Rambo and North (2008) dan Chantanaorrapint (2010), menyimpulkan bahwa suhu dan kelembaban udara serta perubahannya sepanjang hari, mempengaruhi keberadaan dan pergerakan biota dalam ekosistem hutan. Hasil penelitian Hawley (2010) menyimpulkan: perubahan penetrasi radiasi matahari ke bawah kanopi mempengaruhi keberadaan dan sebaran biota di bawah kanopi.

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

Beberapa studi membuktikan bahwa habitat tepi hutan merupakan area dengan keragaman spesies biota yang tinggi. Perbedaan kondisi abiotik yang tinggi di sekitar tepi menjadikan habitat tepi didiami lebih banyak spesies biota (Cronin and Haynes, 2004). Perbedaan habitat tepi memunculkan efek tepi antar tambalan; demikian halnya pada batas fragmen hutan dengan tempat terbuka. Efek tepi mengubah dinamika hutan, dan menyebabkan pergeseran komposisi spesies, arsitektur hutan dan iklim mikro (Laurance, 2008). Dinamika harian efek tepi iklim mikro sangat kuat pengaruhnya pada migrasi harian biota dalam ekosistem. Kekayaan spesies dalam ekosistem hutan berkaitan erat dengan variasi iklim mikro di sekitar tepi hutan (Gehlhausen *et al.*, 2000). Gradien iklim mikro di batas hutan dengan lingkungan sangat menentukan konsentrasi dan

sebaran spesies biota tertentu (Godefroid and Koedam, 2003; Godefroid *et al.*, 2007; Gradstein, 2008).

Habitat tepi hutan mangrove terkenal kaya akan keragaman spesies biota (ikan, molusca, insekta, dll). Keberadaan dan pergerakan spesies biota dalam hutan mangrove mengikuti perubahan iklim mikro (Wolanski, 2008; Luther and Greenberg, 2009). 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 dalam hutan mangrove, hewan-hewan berbadan lunak sangat sensitif terhadap peningkatan suhu, sedangkan spesies-spesies kepiting lebih dapat bertahan terhadap peningkatan suhu air. Kepiting pohon (*Sesarma leptosoma Hilgendorf*) bermigrasi naik turun pada cabang mangrove dua kali sehari, mengikuti penyinaran matahari (Vannini *et al.*, 1997).

Hasil-hasil penelitian membuktikan bahwa perubahan struktur hutan mangrove akibat penebangan atau perombakan area, akan diikuti proses-proses fisis yang akan berdampak pada tumbuhan dan hewan (Gladstone and Schreider, 2003). Perombakan hutan mangrove meningkatkan penetrasi cahaya dan perubahan energi termal (dengan indikator perubahan suhu udara dll), signifikan mempengaruhi kehidupan biota dalam hutan mangrove (Berger *et al.*, 2008; Hawley, 2010). Perubahan struktur vegetasi dan fungsi ekologis hutan mangrove akibat pemanasan global diperkirakan sangat mempengaruhi keberadaan dan migrasi spesies biota dalam hutan mangrove dan dari lingkungan. Kjerfve and Macintosh (1997) memprediksi: pada saat terjadi pemanasan global, 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.

## 2.10. Parameter Kuantitatif Iklim Mikro

Karakterisasi iklim mikro hutan membutuhkan data kuantitatif, dalam hal ini besaran dan rentang nilai parameter iklim mikro. Parameter kuantitatif yang biasanya digunakan untuk mendeskripsikan iklim mikro hutan ialah: nilai maksimum perbedaan maksimum besaran variabel iklim mikro antara posisi di luar, di tepi dan di dalam hutan (siang dan malam hari), kedalaman efek tepi, dan gradien iklim mikro. Parameter iklim mikro dan hasil-hasil penelitian tentang parameter tersebut adalah sebagai berikut.

- a. Perbedaan kuantitas iklim mikro antara posisi di luar hutan, di tepi dan di dalam hutan, waktu siang dan malam hari.

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 suhu tanah dalam hutan. Kelembaban udara di tempat terbuka berukuran besar pada musim panas, 5 – 10 % lebih rendah dari dalam hutan. Kelembaban udara dan defisit tekanan uap bergantung pada suhu udara (Spittlehouse *et al.*, 2004). Suhu udara di dalam hutan pada siang hari lebih rendah, sedangkan kelembaban relatif 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). 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). Suhu udara dalam hutan pada waktu malam lebih tinggi 1°C dari tempat terbuka (Chen *et al.*, 1995; Spittlehouse *et al.*, 2004). Raynor (1971), Chen *et al.* (1995), dan Davies-Colley *et al.* (2000), mengemukakan: kecepatan angin di bawah kanopi hutan yang berbatasan dengan area terbuka berukuran besar, berkisar 10 hingga 20 % dari kecepatan di tempat terbuka. Ukuran area terbuka menentukan kecepatan angin. Kecepatan angin di tempat terbuka berukuran kecil dari 0.1 ha, tidak berbeda signifikan dengan di dalam hutan (Spittlehouse *et al.*, 2004). Suhu tanah di bawah kanopi hutan pada siang hari 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).

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 relatif tertinggi antara bagian dalam hutan dengan lingkungan terbuka adalah 6 % (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 ( $33.67 \pm 0.46$  °C) sedangkan di kolam dalam hutan ( $24.64 \pm 0.19$  °C). Suhu air maksimum siang hari di kolam terbuka 7.0–9.0 °C lebih tinggi dari kolam dalam hutan. Suhu air kolam di tepi hutan, maksimum  $26.13 \pm 0.35$  °C. Suhu air minimum harian lebih panas di kolam terbuka ( $25.16 \pm 0.06$  °C) daripada di kolam yang ada di tepi ( $24.18 \pm 0.15$  °C) dan di dalam hutan ( $23.75 \pm 0.19$  °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.

- b. Kedalaman Efek tepi. Efek tepi hutan terjadi antara dua habitat berbeda yang terpisah secara tajam (Matlack, 1994). 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 (Malcolm, 1994; Chen *et al.*, 1995; Benitez-Malvido, 1998; Laurance *et al.*, 2006; Nascimento *et al.*, 2006).

Efek tepi digunakan untuk mengkarakterisasi kondisi hutan dan pengaruh 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, dan kecepatan angin. Penyinaran matahari sebagai pengendali energi bagi biota dalam hutan, mempengaruhi hubungan efek tepi abiotik dan biotik. Efek tepi yang ditunjukkan oleh keberadaan dan pergerakan spesies biota dalam habitat tepi, berkaitan dengan perubahan temporal dan spasial iklim mikro (Clark and Gilbert, 1982; Lidicker, 1999; Manson *et al.*, 1999; Cadenasso and Pickett, 2001; Cubina and Aide, 2001).

Kedalaman efek tepi didefinisikan sebagai jarak dari tepi ke dalam hutan yang masih dipengaruhi perubahan biotik dan/atau abiotik lingkungan (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 dalam habitat tepi, dan antara hutan dengan lingkungan. Kedalaman maksimum efek tepi iklim mikro (harian) digunakan sebagai acuan untuk menetapkan zona habitat tepi (Fagan *et al.* 1999; Ewers *et al.*, 2007).

Penelitian oleh Didham and Lawton (1999) menyimpulkan: kedalaman efek tepi untuk kebanyakan variabel iklim mikro dan struktur vegetasi pada tepi terbuka, dua hingga lima kali dari kedalaman efek tepi pada tepi tertutup. Perbedaan besaran ini menunjukkan bahwa struktur tepi adalah satu diantara determinan utama iklim mikro (Chen *et al.*, 1995; Davies-Colley *et al.*, 2000; Laurance *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 (1995), mencatat kedalaman pengaruh efek tepi iklim mikro mencapai 40 m. Hasil penelitian Spittlehouse *et al.* (2004), menyimpulkan bahwa kedalaman efek tepi kelembaban udara sama dengan suhu udara. Davies-Colley *et al.* (2000) menyimpulkan bahwa pada jarak 80 m dari tepi ke dalam hutan, kuat penerangan 0.7% dan kecepatan angin hanya 20% dari kuat penerangan dan kecepatan angin di tempat terbuka.

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 spesies biota (Laurance *et al.*, 2002). Penelitian Gladstone and Schreider (2003), Dunham *et al.* (2003), Morrisey *et al.* (2007) dan Burton and Travis (2008), membuktikan bahwa gangguan pada struktur hutan mangrove akan diikuti proses-proses fisis yang akan membawa efek pada tumbuhan dan hewan. 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. Laurance (2008) mengemukakan bahwa efek tepi mengubah dinamika hutan dan banyak fitur pohon, sehingga menyebabkan pergeseran komposisi spesies, arsitektur hutan dan iklim mikro. Hasil penelitian Laurance 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.

- c. Gradien iklim mikro. 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. Satuan gradien kuat penerangan menurut sistem internasional adalah lux/m, suhu: °C/m dan kelembaban: %/m.

Gradien iklim mikro merupakan parameter yang sangat menarik dan sejak lama telah digunakan peneliti untuk mendeskripsikan iklim mikro ekosistem hutan (Liechty *et al.*, 1992; Carmago and Kapos, 1995; Ehrenfeld *et al.*, 1997; Redding *et al.*, 2003; Heithecker and Halpern, 2007). Beberapa artikel tidak mendefinisikan gradien iklim mikro secara eksplisit sebagai besaran kuantitatif. Parameter gradien sering tidak jelas dibedakan dengan variasi spasial (*spatial variability*) iklim mikro. Beberapa peneliti (Chen *et al.*, 1995; Brosfokske *et al.*, 1997; Davies-Colley *et al.*, 2000; Ibromet *et al.*, 2007) menyatakan gradien sebagai perubahan spasial variabel iklim mikro dalam kategori: terjal – landai –

datar. Deskripsi besaran gradien sering disatukan dengan kedalaman pengaruh tepi atau efek tepi (Chen *et al.*, 1995; Dong *et al.*, 1998; Davies Colley *et al.*, 2000). Chen *et al.* (1995) mengemukakan: secara keseluruhan gradien 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 suhu udara secara kuantitatif, sebagai perbandingan antara selisih suhu tepi dengan posisi dalam hutan, terhadap jarak posisi tersebut dari tepi (Renhorn *et al.* 1997; Williams-Linera *et al.* 1998; Cienciala *et al.* 2002; Godefroid *et al.*, 2006). Gradien ini dikenal sebagai gradien iklim mikro tepi – interior hutan. 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 kedalaman efek tepi dengan selisih terbesar nilai variabel iklim mikro di tepi dengan bagian dalam hutan. Nelson *et al.* (2007), melakukan penelitian dan mendeskripsikan gradien suhu udara sebagai perbandingan selisih suhu dengan jarak antar stasiun 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. Mendoza *et al.* (2005), menggunakan pendekatan yang sama dengan Nelson *et al.*, dan mendeskripsikan gradien sebagai selisih besaran iklim mikro untuk setiap jarak 1 m dari tepi ke dalam hutan.

Hasil penting yang diperoleh dari penelitian gradien iklim mikro adalah:

- 1) 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. Nilai gradien tepi dan kedalaman efek tepi berbeda-beda antara variabel iklim mikro (Gehlhausen *et al.*, 2000; Godefroid *et al.*, 2006). Gradien terjal ditunjukkan oleh variabel kuat penerangan (Chen *et al.*, 1995), suhu tanah (Gehlhausen *et al.*, 2000; Davies-Colley *et al.*, 2000) dan kecepatan angin (Spittlehouse, 2004). Kelembaban relatif memiliki gradien paling landai (mencapai jarak terjauh ke dalam hutan) (Gehlhausen *et al.*, 2000).

Hasil penelitian Godefroid *et al.* (2006) menunjukkan bahwa suhu udara secara spasial lebih berfluktuasi daripada suhu tanah. Godefroid *et al.* mencatat beda suhu udara pada jarak 120 m dari tepi mencapai 10°C dan suhu tanah 2.8°C. Pohon berusia tua di Douglas-fir forest, menunjukkan variasi suhu udara sebesar 2,7°C untuk jarak 200 m dari tepi, sedangkan suhu tanah bervariasi sebesar 5,9°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, dan merupakan karakteristik ekosistem dan lingkungan berbatasan.

- 2) 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. Newmark (2001) mengemukakan bahwa gradien suhu udara dan defisit tekanan uap secara spasial variasinya rendah (gradien landai), namun secara temporal variasinya tinggi. Gradien intensitas radiasi matahari variasinya tinggi baik secara spasial maupun temporal. Gradien iklim mikro

- menunjukkan keadaan sesaat dimana terjadi kesetimbangan termal antara hutan dengan lingkungan, yakni pada saat nilai gradien nol.
- 3) 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 (topografi, 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 batas mangrove-laut dan menyebabkan variasi spasial variabel iklim mikro lainnya. Gradien iklim mikro bervariasi, bergantung pada kecepatan dan arah angin (Davies-Colley *et al.*, 2000). Angin yang bertiup keluar hutan, menyebabkan suhu dan kelembaban udara menjadi stabil pada jarak relatif dekat dari tepi hutan; sebaliknya, angin bertiup ke dalam hutan, menyebabkan perubahan suhu dan kelembaban udara menjadi lebih jauh ke dalam hutan. Davies Colley *et al.*(2000) menyarankan untuk pengukuran dengan memperhitungkan pengaruh angin yang bertiup ke arah hutan, jarak minimal adalah 40 m dari tepi. Davies-Colley *et al.* (2000) mencatat elevasi suhu udara 2°C dan deficit tekanan uap air 2 mB dekat tepi hutan. Chen *et al.* (1993a) melaporkan hasil yang sama tentang kondisi suhu udara dan kelembaban udara dalam pengukuran di tepi Douglas-fir *forest*.
  - 4) 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. Kondisi gradien iklim mikro sepanjang transek memotong tepi tambalan, 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.
  - 5) Data gradien iklim mikro untuk pemantauan spesies biota. Data gradien iklim mikro dibutuhkan dalam studi tentang keberadaan spesies biota (Gehlhausen *et al.*, 2000; Gradstein, 2008). Gehlhausen *et al.* (2000), mengemukakan bahwa gradien iklim mikro dari tepi ke tengah hutan memberi informasi tentang distribusi spesies dalam habitat tepi. Gradien suhu udara dan kelembaban udara menunjukkan pengaruh signifikan terhadap keberadaan spesies tertentu dalam hutan (Godefroid *et al.*, 2007). 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 spesies dari luar, datang ke daerah tepi hutan. Berbagai spesies biota yang hidup di habitat tepi, dikendalikan oleh penyinaran dan fluks termal, yang terdeteksi melalui perubahan gradien iklim mikro (Gradstein, 2008). Gradstein (2008) mengemukakan bahwa nilai kekayaan spesies 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.

- d. *Time lag* penyinaran dengan perubahan variabel iklim mikro. 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 langsung berubah bersamaan dengan perubahan penyinaran matahari. Perbedaan waktu perubahan kuat penerangan dengan variabel iklim mikro lainnya, disebabkan oleh proses absorpsi energi cahaya, perubahan energi yang diabsorpsi menjadi energi termal, dan proses difusi dalam ekosistem dan antara ekosistem dengan lingkungan. Waktu yang dibutuhkan untuk absorpsi, proses radiasi termal dan difusi termal, bergantung pada sifat fisis materi (kapasitas panas jenis, konduktivitas atau difusivitas bahan) yang ada dalam ekosistem dan lingkungan. Perbedaan waktu ini dikenal sebagai *time lag* yang merupakan karakteristik ekosistem dan lingkungan berbatasan. Parameter *time lag* belum banyak digunakan untuk mengkarakterisasi ekosistem hutan.

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) dalam 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 cm, 10 cm) sesudah panen menjadi tiga kali lebih lambat daripada sebelum panen. Peneliti terdahulu menetapkan besaran *time lag* ini berdasarkan nilai maksimum dan minimum perubahan harian suhu permukaan tanah. Sellars *et al.* (2001) menentukan *time lag* suhu udara pada bagian atas kanopi dengan bagian bawah kanopi menggunakan korelasi silang. 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 Sellars *et al.* 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.

### **2.11. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Perubahan Temporal dan Variasi Spasial Parameter Iklim MikroHutan**

Data faktor-faktor yang mempengaruhi parameter iklim mikro sangat dibutuhkan dalam karakterisasi iklim mikro hutan. Pertimbangan penetapan transek dan posisi pengukuran, waktu dan interval waktu pengukuran, pengontrolan bias variabel iklim mikro yang hendak diukur, hingga interpretasi luaran penelitian, membutuhkan pemahaman tentang faktor-faktor yang berpengaruh di lapangan. Banyaknya faktor berpengaruh di lapangan menentukan

kompleksitas analisis; semakin banyak faktor, semakin kompleks analisis yang harus dilakukan untuk mendapatkan luaran yang sah.

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 tambalan (Pinto *et al.*, 2010), dan struktur kanopi (adanya celah, tingkat tutupan kanopi, tinggi pohon) (Mohamed *et al.*, 2009). Faktor atmosfer, dan kondisi ekosistem hutan dan 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 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 nilai eksak tapi suatu rentang besaran yang variasinya bergantung pada faktor-faktor yang mempengaruhi iklim mikro di lapangan. Penelitian pengaruh faktor atmosfer dapat dilakukan dengan cara mengukur atau mengambil data pada kondisi atmosfer bervariasi. Pengukuran pengaruh kecepatan angin terhadap iklim mikro misalnya, perlu dilakukan pada kondisi kecepatan angin tinggi dan rendah, masing-masing dengan arah angin: dari tepi ke tengah hutan, dan dari hutan ke tepi. 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 variabel: 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 tutupan awan dengan kondisi ekosistem yakni topografi, orientasi tepi (posisi terhadap lintasan matahari), struktur dan tutupan kanopi. Penelitian pengaruh tutupan awan terhadap iklim mikro, dapat dilakukan dengan cara mengukur variabel iklim mikro pada kondisi cuaca cerah dan pada kondisi tutupan awan tebal.
- 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). Penelitian pengaruh curah hujan terhadap iklim mikro dilakukan dengan mengukur atau mengambil data iklim mikro pada musim kemarau dan musim hujan. Intensitas curah hujan selama pengambilan data harian, diukur bersamaan dengan pengukuran variabel iklim mikro.
- c. Suhu dan kelembaban udara regional. Suhu dan kelembaban udara regional mengalami perubahan karena faktor ekologis hutan, sehingga menjadi variabel iklim mikro hutan (Brosofske *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. 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 gradien iklim mikro

bervariasi bergantung pada kecepatan dan arah angin. Angin yang bertiup dari tepi ke dalam hutan, menyebabkan penetrasi iklim mikro bertambah lebih jauh dibandingkan tanpa angin atau jika angin bertiup ke arah berlawanan (Spittlehouse *et al.*, 2004). 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:

- a. 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, bergantung pada besarnya transmisi energi cahaya dan emisi termal oleh komponen-komponen sistem 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, pabrik dll. Lingkungan berbatasan yang ditumbuhi belukar dengan yang ditumbuhi pepohonan, akan menyebabkan perbeccaan fluktuasi iklim mikro dalam ekosistem hutan, karena perbedaan 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. Fluks termal siang hari di batas hutan dengan lahan terbuka, mengalir dari lingkungan ke dalam hutan, sedangkan pada malam hari dari hutan ke lingkungan (Chen *et al.*, 1995; Brosofske *et al.*, 1997; Davies-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 terhadap difusivitas spesies biota (Orrock and Danielson, 2005).
- b. 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 (Raghubanshi and Tripathi, 2009), bentuk dan jarak antar tambalan, usia fragmen hutan dan tambalan berdampingan, keragaman jenis vegetasi (Game, 1980; Blouin and Connor, 1985; Pinto *et al.*, 2010). Tepi tambalan berbentuk lurus dan panjang lebih efektif dalam mempertahankan kekayaan spesies dibanding tepi bundar (Game, 1980).  
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 bertambahnya lebar hutan penyangga,

perbedaan suhu udara di dalam hutan dengan di tepi makin besar. Fragmen hutan berukuran lebih dari 10 ha dapat menstabilkan suhu tanah, suhu udara, dan kelembaban udara hingga jarak 90–120 m dari tepi (De Siqueiran *et al.*, 2004).

Penetrasi efek tepi dipengaruhi oleh tambalan berdekatan (Fletcher, 2005; Pinto *et al.*, 2010). Koridor dalam tambalan mempengaruhi difusivitas spesies biota (Orrock and Danielson, 2005); hal ini dapat diduga karena pengaruh penyinaran dan perubahan kondisi termal terhadap proses pasokan nutrisi dan aktivitas biota. Koridor dalam tambalan menyebabkan efek tepi yang baru, walaupun dalam skala kecil dibanding tepi hutan yang berbatasan dengan area terbuka luas. Struktur fragmen hutan yang terdiri dari beberapa tambalan berdekatan, mempengaruhi difusi energi cahaya dan energi termal, sehingga mempengaruhi besaran parameter iklim mikro. Pola spasial vegetasi dari tepi ke dalam hutan sangat kuat mengontrol perubahan gradien kedalaman efek tepi iklim mikro (Asbjornsen *et al.*, 2004; Breshears *et al.*, 2009; Duniway *et al.*, 2010).

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. Kedalaman efek tepi dapat mencapai empat hingga enam kali ketinggian pohon dari tepi yang terbuka (Chen *et al.*, 1999; Godefroid *et al.*, 2006). Hennenberg *et al.* (2008), dan Moore *et al.* (2005) yang mengutip Hewlett and Fortson (1982), mengemukakan bahwa pengaruh bayangan yang disebabkan oleh belukar, kurang efektif dibanding 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 dan yang tidak homogen, memberikan pengaruh berbeda terhadap perubahan iklim mikro harian. Hutan 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, erosi dan kompaksi tanah serta merusak siklus nutrisi. Perubahan ini dapat mempengaruhi pertumbuhan spesies tumbuhan, dan dalam jangka panjang mengubah komposisi spesies pohon dan diversitas hewan dalam hutan.

Struktur hutan (lebar fragmen hutan), adanya tambalan (jarak, ukuran, usia, bentuk tepi berbatasan), struktur vertikal dan horizontal kanopi, orientasi tepi, dan kondisi lingkungan berbatasan, menjadi pertimbangan utama dalam penetapan transek pengukuran. Transek pengukuran dipilih sesuai tujuan penelitian dan kondisi lapangan. Penetapan transek hendaknya didahului pengamatan awal tentang faktor-faktor ekologis yang berpengaruh signifikan pada variabel iklim mikro. Faktor dan bentuk pengaruhnya pada variabel 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 faktor-faktor tersebut.

- c. Kanopi Hutan. Kanopi hutan mengendalikan pengaruh atmosfer seperti curah hujan, angin dan kelembaban udara, dan menciptakan iklim mikro dalam hutan. Tutupan kanopi mempengaruhi semua variabel iklim mikro, karena menentukan transmisi dan difusi energi cahaya (Black *et al.*, 1991; Örlander and Langvall, 1993; Canham *et al.*, 1999). Penetrasi dan difusi radiasi cahaya mengubah energi termal dalam ekosistem hutan,



sehingga terjadi difusi termal yang menyebabkan perubahan variabel 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; Zulkiflee and Blackburn, 2010), mengurangi presipitasi yang masuk ke bawah kanopi, mengurangi peningkatan suhu udara (Young and Mitchell, 1994; Chen *et al.*, 1995; 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; Brosofske *et al.*, 1997; Wolanski, 2008; Zulkiflee 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, secara khusus menjelaskan pengaruh kanopi terhadap iklim mikro dan besaran parameter iklim mikro. 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 Zulkiflee 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 vertikal mempengaruhi penetrasi cahaya dan gerakan udara, sehingga mempengaruhi gradien suhu dan kelembaban udara.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variabel 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 variabel kuat penerangan), kedalaman efek tepi, gradien di tepi, *time lag* variabel iklim mikro dengan penyinaran.

- d. 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 teoritis lebih berfluktuasi dibanding dalam hutan dengan topografi datar. Penelitian untuk mengevaluasi pengaruh topografi dan kemiringan terhadap perubahan temporal dan spasial iklim mikro dapat dilakukan dengan memilih transek yang mewakili berbagai variasi kemiringan dan arah kemiringan terhadap lintasan matahari.

## 2.12. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Perubahan Temporal dan Variasi Spasial Parameter Iklim Mikro Hutan Mangrove

Ekosistem hutan mangrove dan lingkungan berbatasan, berbeda dengan ekosistem hutan di daratan, namun proses fisis seperti penyinaran, absorpsi energi cahaya, emisi energi termal dan difusi termal dalam ekosistem dan antara ekosistem dengan lingkungan, berlangsung sama. Faktor-faktor yang mempengaruhi parameter iklim mikro hutan mangrove meliputi faktor atmosfer, kondisi ekosistem dan lingkungan berbatasan, sama seperti dalam hutan. Faktor-faktor yang mempengaruhi ekosistem mangrove adalah: (1) perubahan musim (hujan dan kering) (Mazda and Wolanski, 2009), (2) variasi arah dan kecepatan angin (Ridd *et al.*, 1988; Mazda and Wolanski, 2009), (3) perubahan suhu air yang pengaruhnya masuk melalui pasut (Mazda and Wolanski, 2009), (4) perubahan tekanan atmosfer, (5) perubahan karena peningkatan debit air sungai akibat hujan (Kjerfve, 1990; Mazda and Wolanski, 2009). 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 di hutan. Pertimbangan untuk mengevaluasi pengaruh faktor 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. Lingkungan hutan mangrove lebih bervariasi dalam hal penerimaan energi matahari, kapasitas absorpsi energi cahaya, emisi termal dan konduksi/difusi termal, dibanding hutan di daratan. Aliran massa air laut dan sungai dengan kandungan energi termal berbeda-beda dan berubah sepanjang hari, potensial menyebabkan perubahan temporal dan variasi spasial iklim mikro yang lebih signifikan dalam hutan mangrove daripada di dalam hutan. 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.

Struktur pohon mangrove, percabangan, dan keterbukaan kanopi terhadap penyinaran dan kecepatan angin, secara fisis mempengaruhi perubahan temporal dan variasi spasial variabel iklim mikro lainnya (Yoko-o and Tokeshi, 2011). Perubahan struktur kanopi akibat penebangan pohon mangrove, meningkatkan suhu tanah sebesar 13 °C, dan suhu udara sebesar 11 °C (Hernandez *et al.*, 2011). Pengaruh perombakan area hutan mangrove, menyebabkan perubahan suhu air. Menurut Hawley (2010), suhu air maksimum di kolam terbuka lebih tinggi 7.0–9.0 °C daripada di kolam tertutup 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. Pengaruh tutupan kanopi dan daerah terbuka dalam hutan mangrove, dapat diteliti dengan cara memilih transek memotong tepi yang berbatasan dengan daerah terbuka. Pengukuran variabel iklim mikro pada transek ini dapat menghasilkan informasi fluktuasi iklim mikro, gradien 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, penggenangan permukaan lahan oleh air yang mengandung energi termal tertentu, dan berubah sepanjang hari, akan mempengaruhi difusi termal dan iklim mikro dalam hutan mangrove. Snedaker (1995), 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 berbagai jenis hutan mangrove. Pengaruh faktor 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 faktor ekohidrologi dengan iklim mikro merupakan katakteristik iklim mikro hutan mangrove yang dapat diamati pada masing-masing tipe hutan mangrove: *Overwash, Fringe, Riverine, Basin, Hammock,* dan *Scrub*.

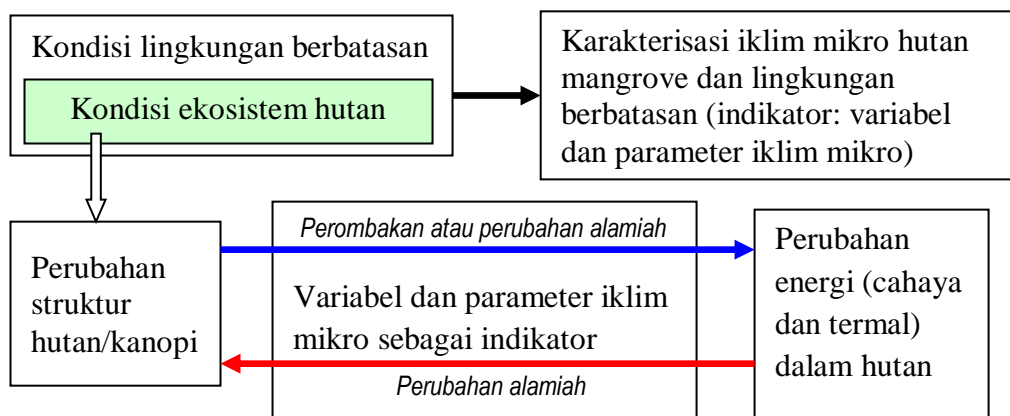
Penelitian dan karakterisasi iklim mikro hutan mangrove untuk masing-masing tipe hutan mangrove dapat menghasilkan data rentang besaran parameter iklim mikro, yang dapat dibandingkan antara satu dengan yang lain. Dampak pemanasan global yang diduga dapat menggeser atau mengubah komposisi hutan mangrove (Snedaker, 1995; Field 1995; Ellison 2005), dapat dikaji berdasarkan perubahan parameter iklim mikro masing-masing tipe hutan mangrove. Pertimbangan pertama dalam penetapan transek pengukuran iklim mikro hutan mangrove, didasarkan pada ekotipe hutan mangrove, karena secara fisis, masing-masing tipe memiliki karakteristik iklim mikro berbeda. Variasi ekologis masing-masing ekotipe mangrove, mencakup variasi kondisi lingkungan berbatasan. Pertimbangan selanjutnya didasarkan pada struktur hutan mangrove (adanya celah atau area terbuka dan tambalan), kerapatan dan homogenitas kanopi dll.

## BAB III METODE PENELITIAN IKLIM MIKRO HUTAN MANGROVE

### 3.1. Adaptasi dan Adopsi Prinsip Penelitian Iklim Mikro Hutan

Penelitian iklim mikro hutan mangrove belum banyak dilakukan. Pembahasan ekosistem hutan, variabel dan parameter iklim mikro memungkinkan untuk dilakukan penelitian iklim mikro hutan mangrove dengan mengadopsi prinsip-prinsip penelitian iklim mikro hutan yang pernah dilakukan oleh para peneliti. Kesimpulan hasil analisis/kajian pustaka dan referensi penelitian iklim mikro hutan, adalah sebagai berikut:

- Perubahan iklim mikro hutan adalah rangkaian proses fisis, mulai dari penyinaran matahari, absorpsi energi cahaya oleh komponen ekosistem hutan dan lingkungan, emisi termal dan difusi termal antar komponen ekosistem dan antara ekosistem hutan dengan lingkungan. Pola perubahan harian iklim mikro hutan dapat diasumsikan bersifat tetap, apabila kondisi ekosistem dan lingkungan tidak berubah; dengan demikian, hutan dapat dikarakterisasi berdasarkan variabel dan parameter iklim mikro.
- Pola perubahan harian iklim mikro hutan dapat mengalami perubahan sesaat, karena pengaruh faktor atmosfer seperti curah hujan, kelembaban udara, suhu udara, kecepatan angin. Pengaruh faktor atmosfer dalam penelitian karakterisasi iklim mikro hutan, dikaji berdasarkan data hasil pengukuran pada kondisi atmosfer bervariasi.
- Iklim mikro (variabel dan parameter kuantitatif) merupakan indikator kondisi ekosistem dan interaksinya dengan lingkungan berbatasan; menjadi indikator perubahan struktur hutan, serta menjadi indikator pengaruh peningkatan energi termal lingkungan terhadap ekosistem hutan (Gambar 3.1).
- Karakterisasi iklim mikro mencirikan kondisi ekosistem dan lingkungan dalam merespons penyinaran matahari dan mengubahnya menjadi energi termal. Perbedaan iklim mikro antar ekosistem dan antar transek dalam satu ekosistem dikarenakan perbedaan respons komponen ekosistem terhadap penyinaran, dan kondisi iklim regional (curah hujan, kelembaban udara, suhu udara, kecepatan angin).



Gambar 3.1. Kedudukan variabel dan parameter iklim mikro sebagai indikator kondisi hutan dan perubahan struktur hutan

- Proses fisis perubahan harian iklim mikro hutan mangrove, sama dengan proses fisis perubahan harian iklim mikro hutan. Penelitian untuk karakterisasi iklim mikro hutan mangrove dapat mengadopsi, mengadaptasi dan mengembangkan penelitian iklim mikro hutan. Variabel iklim mikro yang banyak digunakan peneliti untuk mengkarakterisasi iklim mikro hutan adalah: intensitas cahaya atau kuat penerangan matahari, suhu udara, kelembaban udara, suhu tanah, kelembaban tanah, dan kecepatan angin. Parameter

kuantitatif untuk mendeskripsikan iklim mikro hutan adalah: selisih maksimum besaran iklim mikro antara lingkungan – tepi – interior hutan pada waktu siang dan malam hari, kedalaman efek tepi, gradien dan *time lag* (sangat terbatas). Banyaknya variabel yang diteliti dan parameter yang digunakan untuk mendeskripsikan iklim mikro hutan mangrove, dapat berbeda bergantung pada tujuan penelitian dan kondisi lapangan.

Analisis kritis terhadap penelitian terdahulu, menyimpulkan permasalahan dalam analisis dan penentuan parameter iklim mikro hutan sebagai berikut:

- a. Parameter kedalaman efek tepi. Efek tepi merupakan ukuran kedalaman pengaruh lingkungan atau tambalan berbatasan kedalam fragmen hutan. Kebanyakan penelitian iklim mikro hutan, menentukan parameter kedalaman efek tepi secara langsung dari data pengukuran di lapangan. Kedalaman efek tepi ditentukan sebagai jarak posisi pengukuran (dari tepi) dimana data pengukuran pada posisi berikutnya, sama atau hampir sama. Ketelitian data sangat bergantung pada penetapan posisi pengukuran dan jarak antar posisi pengukuran. Posisi pengukuran berdekatan menghasilkan data kedalaman efek tepi yang lebih teliti, tapi hal ini akan meningkatkan jumlah alat dan bahan yang dibutuhkan, waktu pengukuran, biaya dan tenaga. Bias data kedalaman efek tepi yang diperoleh dengan cara seperti ini akan besar jika pengambilan data dilakukan secara berpindah (*moving station system*). Cara yang dapat dilakukan adalah dengan menetapkan posisi pengukuran berdasarkan jarak logaritmik (sesuai sifat difusi energi dalam medium yang berbentuk eksponensial), dimana posisi dekat tepi jaraknya lebih dekat, seterusnya semakin jauh, dengan bertambahnya jarak dari tepi. Langkah selanjutnya adalah melakukan pemodelan fungsi spasial, yang dikonstruksi menggunakan data pengukuran pada enam atau lebih posisi dekat tepi. Fungsi spasial yang dihasilkan (misalnya fungsi spasial suhu udara  $T(x)$ ), diturunkan menghasilkan fungsi gradien ( $d(Tx)/dx$ ). Kedalaman efek tepi adalah posisi atau jarak dari tepi dimana nilai gradien mendekati nol. Penentuan kedalaman efek tepi dengan cara ini dapat menghindari kesulitan di lapangan untuk melakukan pengukuran hingga jauh ke tengah hutan.
- b. Parameter gradien. Gradien iklim mikro adalah turunan pertama dari fungsi spasial iklim mikro terhadap jarak; dalam hal ini gradien juga berbentuk fungsi. Gradien memiliki nilai tertentu sepanjang transek dari tepi ke dalam hutan. Kebanyakan hasil penelitian iklim mikro hutan, menyatakan gradien dalam kategori terjal – landai; data atau informasi seperti ini belum dapat digunakan untuk mengkarakterisasi iklim mikro hutan. Data gradien terpenting untuk mengkarakterisasi ekosistem hutan adalah nilai dan perubahannya (temporal harian) gradien iklim mikro di tepi (batas hutan dengan lingkungan atau batas antar tambalan). Gradien di tepi menunjukkan: (1) perbedaan variabel iklim mikro lingkungan dengan fragmen hutan, (2) arah difusi termal, yang ditunjukkan oleh perubahan tanda gradien, (3) waktu dan durasi tercapainya kesetimbangan termal.
- c. *Time lag* penyinaran dengan perubahan iklim mikro. Parameter *time lag* dapat digunakan untuk mengkaji difusivitas dan konduktivitas bahan maupun respons (emisi termal) bahan atau obyek terhadap penyinaran matahari. *Time lag* antara perubahan termal (misalnya indikator suhu udara) terhadap penyinaran, merupakan efek gabungan dari pengaruh penyinaran pada obyek/posisi sepanjang transek, dengan difusi termal dari lingkungan. Zheng *et al.* (2000) menggunakan *time lag* untuk menentukan perubahan respons suhu udara, kelembaban udara dan suhu tanah akibat penebangan pohon ek. Besarnya *time lag* ditentukan berdasarkan selisih waktu tercapainya nilai puncak variabel-variabel tersebut, untuk kondisi sebelum dan sesudah penebangan. Data *time lag* yang ditentukan berdasarkan selisih waktu tercapainya nilai puncak, menjadi bias apabila: (1) nilai puncak iklim mikro bertahan dalam durasi yang cukup lama, (2) perubahan mendadak (lonjakan

atau penurunan drastis) variabel iklim mikro sekitar waktu tercapainya nilai puncak, (3) fluktuasi iklim mikro (bukan pola perubahan harian) selama pengukuran.

Validitas *time lag* dapat ditingkatkan berdasarkan fungsi temporal kedua variabel sepanjang hari. *Time lag* antara dua kelompok data (variabel sama untuk posisi berbeda, atau variabel berbeda pada posisi sama) dapat diperoleh dengan menggeser fungsi yang satu terhadap yang lain, sehingga kedua fungsi mendekati simetris (grafik kelihatan berubah bersamaan). Penentuan *time lag* berdasarkan penggeseran fungsi ini dilakukan menggunakan korelasi silang antara kedua kelompok data.

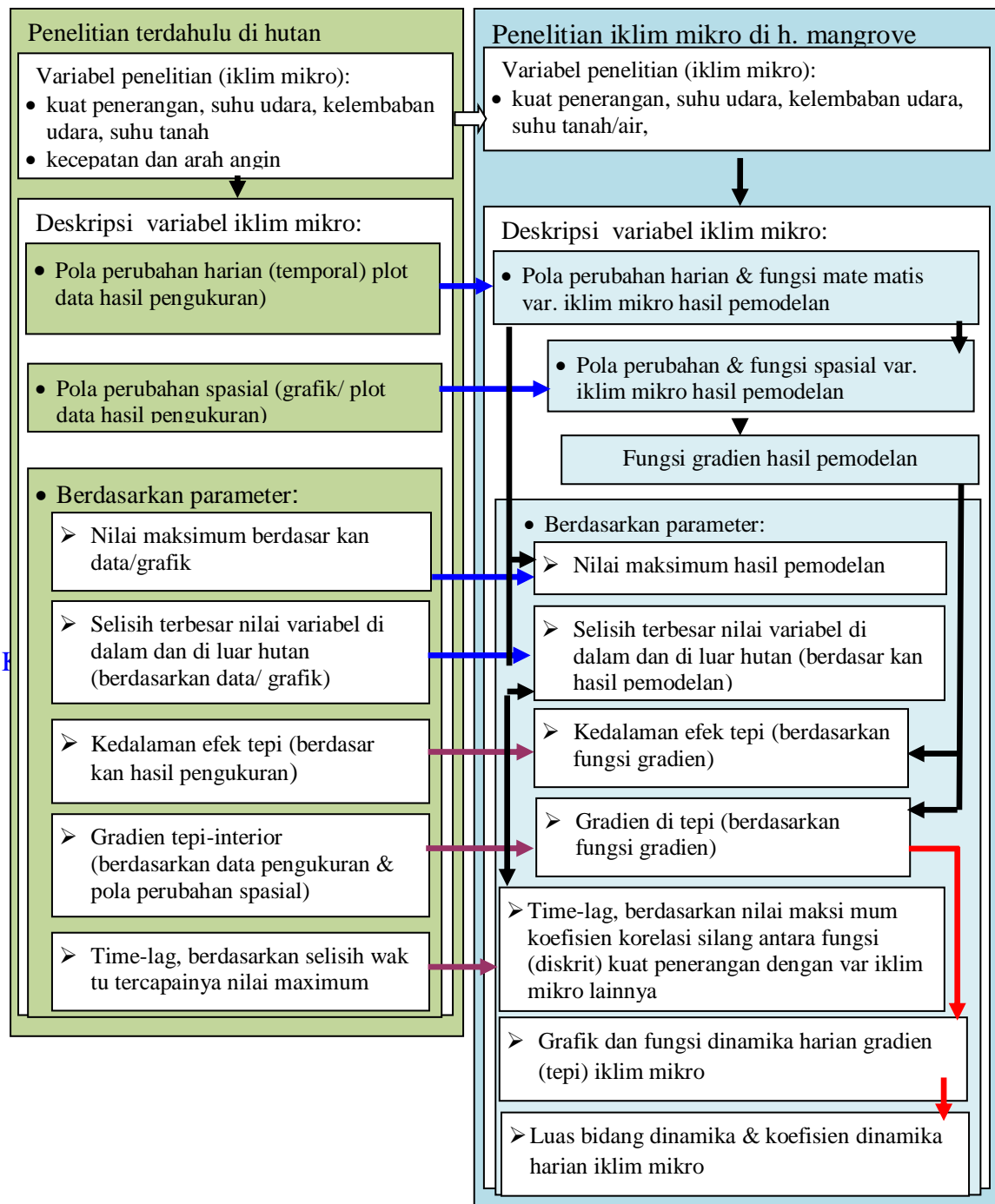
### **3.2. Adaptasi dan pengembangan parameter untuk karakterisasi iklim mikro hutan mangrove**

Penelitian iklim mikro hutan mangrove masih terbatas, sehingga penelitian ini dikembangkan dan dikomparasi dengan penelitian iklim mikro hutan yang telah dilakukan peneliti terdahulu. Landasan ilmiah pengembangan parameter iklim mikro adalah kesamaan proses fisis iklim mikro hutan dan hutan mangrove, yang dikendalikan oleh penyinaran matahari. Perbedaan kondisi ekosistem dan lingkungan merupakan tujuan dari karakterisasi iklim mikro hutan mangrove, sehingga dalam penelitian ini dipilih sepuluh transek yang berbeda kondisi ekosistem dan lingkungan berbatasan. Adaptasi dan pengembangan parameter penelitian disajikan pada Gambar 3.2.

Prosedur penelitian pada Gambar 3.2, menghasilkan sistem data (kuantitatif) parameter iklim mikro yang mengkarakterisasi iklim mikro hutan mangrove sekitar transek penelitian. Sistem data merupakan sekumpulan data parameter iklim mikro, sebagai satu kesatuan data, yang mendeskripsikan kondisi ekosistem dan perubahan hariannya, serta interaksinya dengan lingkungan berbatasan. Sistem data ini meliputi:

- a. Nilai maksimum dan minimum iklim mikro di dalam dan di luar hutan mangrove. Nilai maksimum dan minimum diperoleh dari harga ekstrim fungsi temporal variabel iklim mikro.
- b. Beda maksimum besaran iklim mikro antara lingkungan – tepi - interior hutan, siang dan malam hari. Data ini diperoleh dari fungsi perubahan temporal iklim mikro. .
- c. Kedalaman efek tepi, sebagai jarak dimana nilai fungsi gradien iklim mikro sama atau mendekati nol. Metode penentuan parameter kedalaman efek tepi dikembangkan peneliti berdasarkan fungsi gradien yang dihasilkan dari pemodelan matematik. Kedalaman efek tepi iklim mikro tidak konstan, tapi berubah sepanjang hari, mengikuti penyinaran dan difusi termal. Kedalaman efek tepi berbeda-beda antar variabel iklim mikro. Data kedalaman efek tepi untuk masing-masing variabel iklim mikro adalah nilai penetrasi maksimum variabel iklim mikro lingkungan ke dalam hutan mangrove. .
- c. Gradien tepi, adalah nilai fungsi gradien iklim mikro pada posisi di tepi hutan. Gradien tepi iklim mikro merupakan parameter baru yang dirumuskan peneliti berdasarkan prosedur pemodelan matematik. Nilai gradien tepi untuk setiap variabel iklim mikro berubah sepanjang hari. Nilai yang digunakan untuk mengkarakterisasi iklim mikro hutan mangrove adalah nilai maksimum.
- d. *Time lag* antara penyinaran matahari dengan perubahan variabel iklim mikro.

Metode penentuan *time lag* (antara perubahan kuat penerangan dengan variabel iklim mikro), dikembangkan peneliti menggunakan teknik korelasi silang antara dua fungsi atau dua kelompok data. Korelasi silang adalah perkalian dengan menggeser fungsi yang satu terhadap yang lain sehingga menjadi atau mendekati simetris. Korelasi silang dilakukan dengan menggeser mundur fungsi kuat penerangan (basis waktu) terhadap fungsi variabel iklim mikro: suhu udara, kelembaban udara, suhu air/tanah.



Adaptasi  
 Adaptasi&komparasi  
 Pengembangan parameter baru  
 Tahapan analisis/pemodelan  
 Adaptasi&pengembangan

Gambar-3.2.. Skema adaptasi dan pengembangan parameter iklim mikro di hutan mangrove

- e. Luas bidang dinamika harian gradien iklim mikro. Luas bidang dinamika harian gradien iklim mikro adalah parameter iklim mikro yang dirumuskan dan dikembangkan peneliti melalui penelitian disertasi ini. Parameter ini merupakan lanjutan dan melengkapi data atau luaran parameter gradien tepi. Parameter gradien tepi mendeskripsikan keadaan

sesaat yakni perbedaan maksimum iklim mikro antara lingkungan dengan ekosistem hutan, sedangkan parameter luas bidang dinamika harian menunjukkan total gradien tepi harian. Uraian terperinci perhitungan untuk penentuan luas bidang dinamika graden disajikan dalam Bab IV, bagian 4.5 butir n dan o.

- f. Indeks dinamika harian gradien iklim mikro adalah luas bidang dinamika gradien malam hari dibagi luas bidang dinamika gradien siang hari. Indeks dinamika gradien iklim mikro tidak memiliki satuan. Indeks dinamika gradien menunjukkan kapasitas ekosistem hutan mengendalikan pengaruh peningkatan difusi termal dari lingkungan berbatasan, sekaligus kapasitas ekosistem hutan dalam menyimpan energi yang diterima dari matahari dan dari lingkungan berbatasan. Parameter indeks dinamika harian gradien iklim mikro merupakan satu kesatuan dengan parameter luas bidang dinamika harian gradien iklim mikro.

Keseluruhan parameter iklim mikro ini merupakan satu kesatuan parameter yang dapat menghasilkan sistem data sebagai karakteristik ekosistem hutan (pada transek pengukuran dan sekitarnya). Parameter-parameter tersebut, dapat memberikan informasi dini tentang perubahan kondisi ekosistem dan lingkungan. Skema yang 9 (Gambar-3.2) dapat dijadikan panduan dalam pengembangan, adopsi dan adaptasi konsep, metode dan hasil-hasil penelitian parameter ekosistem hutan ke ekosistem mangrove.

### 3.3. Variabel-variabel Penelitian Iklim Mikro Hutan Mangrove

Variabel-variabel yang dapat diukur/diteliti untuk mendeskripsikan kondisi iklim mikro hutan mangrove adalah:

- a. Variabel suhu udara: ialah suhu udara di atas permukaan lahan atau air pada posisi pengukuran sepanjang transek. Posisi (vertikal) pengukuran didasarkan pada hasil pengamatan di lapangan, untuk disesuaikan dengan tinggi permukaan air dan naungan kanopi. Khusus untuk pengukuran pada *fringe forest* dan *riverine forest*, tinggi posisi pengukuran dari permukaan air bervariasi antara 0,6 hingga 1 m, sesuai tinggi permukaan air. Posisi pengukuran vertikal dalam hutan mangrove tipe *basin*, *hammock* dan *scrub*, satu meter di atas permukaan tanah. Variabel suhu udara untuk setiap posisi, diukur selama 24 jam dengan interval waktu satu jam, sehingga untuk setiap posisi pengukuran diperoleh 24 data. Variabel suhu udara diukur menggunakan digital instrumen “*four in one*”, yang mengukur sekaligus variabel suhu udara, kelembaban udara, kuat penerangan cahaya matahari, dan kecepatan angin.
- b. Variabel kelembaban udara atau kelembaban relatif: ialah kelembaban udara di atas permukaan lahan atau air, pada posisi pengukuran sepanjang transek. Posisi vertikal pengukuran kelembaban udara sama dengan pengukuran suhu udara. Pengukuran kelembaban udara menggunakan alat yang sama dengan yang digunakan untuk mengukur suhu udara. Besaran kelembaban udara dinyatakan dalam satuan %. Posisi pengukuran variabel kelembaban udara sama dengan posisi pengukuran suhu udara. Pengukuran selama 24 jam dengan interval waktu 1 jam, menghasilkan 24 data kelembaban udara harian untuk masing-masing posisi sepanjang transek.
- c. Variabel kuat penerangan matahari ialah kuat penerangan matahari pada posisi pengukuran sepanjang transek. Posisi pengukuran variabel kuat penerangan sama dengan posisi pengukuran suhu udara dan kelembaban udara. Variabel kuat penerangan matahari diukur mulai jam 06.00 sampai 18.00 dengan interval waktu pengukuran satu jam, menghasilkan 13 data untuk masing-masing posisi pengukuran.
- d. Variabel suhu tanah/air ialah suhu permukaan tanah atau suhu permukaan air laut pada posisi pengukuran sepanjang transek. Pada saat lahan tergenang air, maka suhu yang diukur adalah suhu permukaan air, menggunakan thermometer celup/tusuk, dengan kepekaan 0,1 °C. Suhu permukaan air adalah suhu pada kedalaman kurang dari satu centimeter. Pengukuran suhu tanah dilakukan pada saat permukaan tidak tergenang air.



Suhu tanah diukur pada kedalaman kurang dari satu centimeter, menggunakan thermometer tusuk.

- e. Variabel kecepatan angin. Pengukuran dilakukan pada kondisi kecepatan angin sangat rendah (kurang dari 1 m/sec), sehingga kecepatan angin tidak dianalisis seperti variabel lain, namun dilakukan simulasi untuk menganalisis pengaruhnya pada variabel suhu udara dan kelembaban udara. Dalam simulasi, rentang kecepatan angin antara 0 – 50 m/sec. Pola spasial kecepatan angin dimodelkan berdasarkan hasil-hasil penelitian terdahulu tentang kedalaman efek tepi kecepatan angin dalam hutan.

### 3.4. Prosedur Pengukuran, Analisis dan Pemodelan

Prosedur atau langkah-langkah penelitian adalah sebagai berikut :

- a. Penetapan transek pengukuran berdasarkan ekotipe hutan mangrove, lingkungan berbatasan, adanya tambalan, adanya celah, variasi tinggi tegakan mangrove, variasi tutupan kanopi.
- b. Penetapan posisi pengukuran pada masing-masing transek, menggunakan jarak logaritmik terhadap tepi hutan sebagai posisi acuan. Posisi pengukuran sepanjang transek adalah: 4 m dan 2 m dari tepi ke arah luar hutan mangrove, di tepi (sebagai posisi acuan:  $x = 0$ ), dan pada jarak 1 m, 2m, 4m, 8m, 16m, dan 32 m dari tepi. Pada dua transek (transek-2, lokasi desa Talengen, dan transek3, lokasi desa Ratatotok Timur), pengambilan data suhu udara dan kelembaban udara juga dilakukan pada jarak 64 m dari tepi ke dalam hutan. Pengukuran ini ditujukan untuk menguji validitas fungsi pemodelan dalam memprediksi suhu dan kelembaban udara pada posisi tersebut.
- c. Pelaksanaan pengukuran atau pengambilan data variabel penelitian, dengan cara berpindah dari posisi paling luar hingga paling dalam. Selisih waktu memulai pengukuran dari posisi satu ke posisi berikutnya dicatat untuk sinkronisasi data. Pada setiap posisi, diukur sekaligus variabel suhu udara, kelembaban udara, kuat penerangan dan suhu tanah.
- d. Identifikasi jenis mangrove, pengukuran tinggi pohon, dan tutupan kanopi (menggunakan gambar area yang ditembusi cahaya pada arah vertikal), dilakukan belakangan pada saat pasut maksimum (6 – 7 hari berikutnya), sekitar jam 12.00.
- e. Tabulasi data hasil pengukuran (masing-masing variabel per transek) dalam format matriks, dengan barisnya adalah posisi pengukuran, dan kolomnya adalah waktu pengukuran. Format matriks data seperti Table 3.1.:

Tabel 3.1. Format tabulasi data hasil pengukuran

Variabel: ..... Lokasi: ..... no. transek: .....

| Posisi | waktu pengukuran |       |  |              |  |  |       |
|--------|------------------|-------|--|--------------|--|--|-------|
|        | 06.00            | 07.00 |  | $t_i$        |  |  | 06.00 |
| 1      |                  |       |  | $T(-4, t_i)$ |  |  |       |
| 2      |                  |       |  |              |  |  |       |
| 3      |                  |       |  | $T(0, t_i)$  |  |  |       |
| 4      |                  |       |  |              |  |  |       |
| 5      |                  |       |  |              |  |  |       |
| 6      |                  |       |  |              |  |  |       |
| 7      |                  |       |  |              |  |  |       |

- f. Pemodelan perubahan temporal harian variabel suhu udara, kelembaban udara, kuat penerangan dan suhu tanah/air. Pemodelan perubahan temporal variabel iklim mikro menggunakan prosedur pemodelan fungsi Fourier. Pemodelan ini dilakukan per posisi pengukuran, sehingga dihasilkan fungsi perubahan temporal untuk masing-masing posisi pengukuran. Model fungsi Fourier untuk masing-masing posisi pengukuran adalah:

$$T(t) = T_0 + \sum_{m=1}^{N/2} a_m \cos \omega_m t + b_m \sin \omega_m t \dots\dots\dots(3-1)$$

$$\omega_m = 2\pi m/N \dots\dots\dots(3-2a)$$

$$a_m = \frac{2}{N} \sum_{t=0}^{N-1} f(t) \cos \omega_m t \dots\dots\dots(3-2b)$$

$$b_m = \frac{2}{N} \sum_{t=0}^{N-1} f(t) \sin \omega_m t \dots\dots\dots(3-2c)$$

m adalah pencacah harmonik, dan N adalah banyaknya data (pasangan data variabel bebas waktu (t) dan variabel terikat suhu udara (T)), f(t) adalah data suhu udara hasil pengukuran di lapangan.

Pengukuran selama 24 jam dengan interval satu jam untuk variabel: suhu udara, kelembaban udara, suhu air/tanah, menghasilkan 24 data (N=24). Variabel kuat penerangan diukur mulai jam 06.00 sampai jam 18.00 dengan interval waktu pengukuran satu jam, menghasilkan jumlah data N = 13. Banyaknya harmonik adalah N/2, sehingga untuk 24 data pengamatan, nilai m adalah: 1, 2, .....,12. Banyaknya harmonik ....., untuk variabel kuat penerangan adalah 6 harmonik, diperoleh dari jumlah data N = 13. Harmonik adalah bilangan cacah, sehingga untuk N = 13, m = 6. Langkah pemodelan fungsi Fourier adalah:

- 1) Menentukan nilai koefisien  $a_m$  dan  $b_m$ , menggunakan Persamaan (3-2b) dan (3-2c).
- 2) Menentukan koefisien  $c_m^2 = a_m^2 + b_m^2$ .
- 3) Menentukan sumbangan keragaman:  $s_m = (c_m^2 / (2 \cdot \sigma)) * 100$

$\sigma$  adalah simpangan baku data variabel iklim mikro. Tahapan ini menghasilkan nilai  $a_m$ ,  $b_m$ ,  $c_m$  dan  $s_m$  untuk  $m = 1, 2, \dots, 12$ . Data besaran sumbangan keragaman ( $s_m$ ), dijadikan acuan penentuan banyaknya harmonik yang dibutuhkan untuk mengkonstruksi fungsi suhu (dan variabel iklim mikro lainnya). Penyimpangan data model terhadap data hasil pengukuran, semakin kecil jika diambil harmonik yang lebih banyak. Fungsi temporal yang tidak berfluktuasi besar dapat dikonstruksi dari beberapa suku pertama, tapi jika fungsi temporal sangat berfluktuasi, maka digunakan seluruh harmonik.

Tahapan ini, menampilkan grafik perubahan temporal variabel iklim mikro untuk setiap posisi pengukuran, dan luaran tentang nilai maksimum siang hari dan malam hari, besaran dan waktu tercapainya selisih maksimum antara posisi tepi dengan interior hutan dll.

- g. Sinkronisasi data antar posisi. Sinkronisasi ini harus dilakukan karena data tidak diukur serempak, tapi berpindah dari satu posisi ke posisi berikutnya, sepanjang transek (*moving station system*). Sinkronisasi data dilakukan dengan memasukkan data selisih waktu pengukuran dari posisi satu ke posisi berikutnya, ke dalam fungsi hasil pemodelan (tahap g). Sinkronisasi ini tidak mengubah fungsi tapi memberikan nilai yang baru untuk setiap posisi. Data hasil sinkronisasi digunakan untuk analisis dan pemodelan spasial sehingga dapat ditentukan data parameter-parameter iklim mikro yang mendeskripsikan variasi spasial.
- h. Pemodelan spasial variabel iklim mikro. Peneliti mengembangkan teknik pemodelan fungsi spasial difusi termal yang berbentuk eksponensial, dengan menggunakan tiga pasangan data acuan dan dikontrol menggunakan tiga atau lebih pasangan data lainnya.

Pengembangan teknik pemodelan fungsi ini bersesuaian dan mendukung metode pengukuran pada beberapa posisi dekat tepi (jarak logaritmik). Teknik pemodelan fungsi spasial data hasil pengukuran pada enam atau lebih posisi sekitar tepi, menjamin efisiensi pengukuran di lapangan dan analisis data yang menghasilkan parameter kuantitatif: kedalaman efek tepi, gradien tepi, luas bidang dan indeks dinamika harian gradien iklim mikro. Teknik pemodelan spasial ini dikonstruksi dari tiga pasangan data lapangan, termasuk data posisi acuan ( $x = 0$ ), dan tiga atau lebih pasangan data kontrol. Model umum fungsi eksponensial difusi adalah:

$$T(x) = k_1 + k_2 \cdot e^{k_3 - k_4 \cdot x} \dots\dots\dots(3-3)$$

dimana  $x$  adalah jarak dari tepi ke tengah mangrove. Konstanta  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  dan  $k_4$  diperoleh dengan teknik iterasi (komputer). Biasanya dibutuhkan empat pasangan data ( $x, T$ ), namun jika dipilih data titik acuan ( $x=0$ ), maka konstanta dan koefisien tersebut, dapat ditentukan berdasarkan tiga pasangan data saja, misalnya pasangan data:  $(0, T_0)$ ,  $(x_1, T_1)$ , and  $(x_2, T_2)$ . Tahapan iterasi untuk menghasilkan konstanta dan koefisien fungsi spasial adalah:

$$(T_0 - T_1) / (T_0 - T_2) = [( \exp(k_4 \cdot x_2) \cdot (\exp(k_4 \cdot x_1) - 1) ) / ( \exp(k_4 \cdot x_1) \cdot (\exp(k_4 \cdot x_2) - 1) )]$$

$$k_3 = (T_0 - T_1) / (1 - 1 / \exp(k_4 \cdot x_1))$$

$$k_2 = (T_0 - T_1) / (\exp(k_3) - \exp(k_3 - k_4 \cdot x_1))$$

$$k_1 = y_0 - k_2 \cdot \exp(k_3)$$

Fungsi hasil pemodelan dapat digunakan untuk menentukan data pada posisi yang tidak diukur.

- i. Penentuan nilai maksimum dan minimum variabel iklim mikro.  
 Nilai maksimum dan minimum variabel iklim mikro ditentukan dari fungsi temporal hasil pemodelan, menggunakan nilai ekstrim  $dT(t)/dt \approx 0$ . Program komputer menentukan waktu tercapainya harga ekstrim ( $t_{ekstrim}$ ) dan nilai variabel iklim mikro (minimum atau maksimum), berdasarkan syarat ekstrim. Data yang berfluktuasi tajam, potensial memunculkan beberapa nilai  $dT(t)/dt \approx 0$ . Program komputer dirancang untuk menentukan harga ekstrim tertinggi dan terendah selama periode satu hari, sebagai nilai maksimum dan minimum variabel iklim mikro. Setiap posisi pengukuran memiliki nilai maksimum dan minimum tersendiri. Program komputer melakukan seleksi untuk menentukan posisi dengan nilai maksimum dan minimum tertinggi diantara transek.
- j. Selisih maksimum variabel iklim mikro antara tepi dengan interior hutan mangrove.  
 Selisih maksimum variabel iklim mikro antara tepi dengan interior hutan adalah nilai selisih tertinggi antara data model di tepi dengan data pada kedalaman efek tepi maksimum, untuk cacah (*sampling*) waktu yang sama. Program komputer dirancang melakukan seleksi nilai selisih tertinggi variabel iklim mikro dari antara nilai selisih untuk setiap cacah waktu. Interval sampling diambil 10 detik untuk dapat mendeteksi secara rinci perubahan nilai variabel, dan menjamin validitas data luaran.
- k. Penentuan kedalaman efek tepi.  
 Kedalaman efek tepi menunjukkan jarak terjauh pengaruh iklim mikro lingkungan, masuk ke dalam ekosistem hutan. Kedalaman efek tepi ditentukan dengan mengambil nilai gradien iklim mikro mendekati nol ( $dT(x)/dx \rightarrow 0$ ). Fungsi gradien iklim mikro  $G(x)$  adalah:

$$G(x) = dT(x)/dx = - k_2 \cdot k_4 \cdot \exp(k_3 - k_4 \cdot x) \dots\dots\dots(3-4)$$

Program komputer dirancang melakukan *looping* hingga diperoleh nilai  $x$ , dimana  $G$  mendekati nol (misalnya  $G = 0.0001$ ). Pemodelan temporal dan sinkronisasi data, dapat menghasilkan fungsi-fungsi spasial sebanyak yang dihendaki. Fungsi spasial yang dihasilkan dari interval waktu satu jam, memberikan 24 nilai kedalaman efek tepi yang berbeda. Program komputer melakukan seleksi data kedalaman terjauh sebagai data kedalaman efek tepi variabel iklim mikro pada transek yang diukur.

l. Penentuan gradien tepi.

Penentuan nilai gradien variabel iklim mikro di tepi mangrove, diperoleh dengan memberi nilai  $x = 0$  pada Persamaan (3-4), dan dihasilkan:

$$G_0 = -k_2.k_4.exp(k_3).....(3-5)$$

Pemodelan temporal menghasilkan sejumlah data gradien sesuai interval waktu yang dihendaki. Program komputer dirancang untuk menentukan gradien tertinggi sepanjang hari, dan menentukan waktu tercapainya keseimbangan termal yakni pada saat nilai gradien tepi sama dengan nol.

m. Penentuan *time lag* kuat penerangan cahaya matahari dengan variabel iklim mikro lainnya.

*Time lag* antara perubahan kuat penerangan cahaya matahari dengan perubahan variabel iklim mikro ditentukan dengan menggunakan korelasi silang antara kedua fungsi. Persamaan korelasi silang antara dua fungsi kontinu dalam domain posisi ( $x$ ) (misalnya antara fungsi kuat penerangan matahari  $I(x)$  dengan suhu udara  $T(x)$ ), dinyatakan dengan:

$$h(x) = I(x)*T(x) = \int_{-\infty}^{\infty} T(x')I(x - x')dx'.....(3-6)$$

$I(x-x')$  adalah nilai fungsi kuat penerangan pada penggeseran  $x'$  dan  $T(x')$  adalah nilai fungsi suhu udara yang merespons. Persamaan (3-6) menunjukkan bahwa operasi korelasi silang, pada hakikatnya adalah operasi konvolusi antara dua fungsi (von Storch and Zwiers, 2001; Sun, 2011). Bentuk diskrit konvolusi  $I(x)$  dengan  $T(x)$  adalah:

$$h(x) = \sum_{x'=-\infty}^{\infty} T(x')I(x - x') .....(3-7)$$

Persamaan (3-6) dan (3-7) menghasilkan nilai maksimum korelasi silang antara dua fungsi pada posisi penggeseran  $x'$  tertentu. Operasi korelasi silang dapat menentukan besaran *time lag* dimana hasil perkalian dua fungsi menunjukkan nilai maksimum. Penentuan *time lag* juga dapat didasarkan pada koefisien korelasi dua fungsi atau kelompok data yang digeser satu terhadap yang lain. Koefisien korelasi silang antara kelompok data  $I(x)$  dengan  $T(x)$  pada nilai penggeseran  $d$ , dinyatakan dengan Persamaan:

$$r_s = \frac{\sum_i^n \{(T(i) - mT).(I(i-d) - mI)\}}{\left\{ \sum_i^n (T(i) - mT)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \left\{ \sum_i^n (I(i-d) - mI)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} .....(3-8)$$

dimana  $r_s$  adalah koefisien korelasi silang,  $n$  adalah banyaknya pasangan data variabel  $I$  dan  $T$ ,  $m$  adalah konstanta,  $i$  adalah cacah data yang diperkalikan, dan  $d$  adalah *time lag* antara variabel  $I$  dengan  $T$ . Penentuan *time lag* antara  $I$  dan  $T$  didasarkan pada nilai maksimum koefisien korelasi  $r_s$ . Proses penentuan *time lag* dilakukan dengan menggeser salah satu fungsi, misalnya  $I$  terhadap  $T$ . Koefisien korelasi silang tertinggi, menunjukkan kedua fungsi dalam keadaan paling simetris dengan nilai penggeseran  $d$ ; nilai  $d$  adalah *time lag* antara kedua fungsi. Penggeseran variabel dapat dilakukan dengan memajukan fungsi yang tertinggal, atau memundurkan fungsi yang mendahului (Wen and Li, 2007). Dalam penelitian ini, penentuan *time lag* didasarkan pada harga maksimum koefisien korelasi silang yang diberikan oleh Persamaan (3-8). Program

komputerdirancang melakukan iterasi maju atau mundur, sehingga lebih fleksibel dalam menganalisis data.

- n. Pemodelan fungsi dinamika harian gradien iklim mikro di tepi hutan. Penentuan gradien tepi (tahap 1) menghasilkan pasangan data waktu dengan gradien. Nilai  $G_0$  yang dihasilkan dari tahapan 1 (Persamaan 3-5) memiliki padanan waktu tertentu, sesuai waktu yang diambil dalam pemodelan spasial. Pasangan data waktu dengan gradien tepi sepanjang hari, dapat dikonstruksi dan menghasilkan fungsi dinamika harian gradien iklim mikro di tepi. Perubahan spasial dan perubahan gradien iklim mikro mengikuti penyinaran matahari dan difusi termal sepanjang hari sehingga berbentuk sinusoidal. Pemodelan fungsi dinamika harian gradien iklim mikro menggunakan prosedur yang sama dengan pemodelan temporal variabel iklim mikro (tahap f).
- o. Penentuan luas bidang dinamika harian gradien iklim mikro. Luas bidang dinamika harian gradien iklim mikro dihitung menggunakan pendekatan integral numerik. Fungsi dinamika harian gradien iklim mikro yang dihasilkan dari tahap n, dapat menghasilkan data (model) dinamika harian gradien iklim mikro. Banyaknya data yang dihasilkan bergantung pada interval sampling yang dipilih; semakin kecil interval sampling ( $\Delta t$ ) semakin banyak data model yang diperoleh. Luas bidang ditentukan dengan Persamaan:

$$A = \sum_{i=t_1}^{t_2} G_i \cdot \Delta t \dots \dots \dots (3-9)$$

$G_i$  adalah nilai gradien pada waktu  $i = t + \frac{1}{2} \Delta t$ .  $t$  adalah besaran waktu yang bertambah sebesar  $\Delta t$  mulai dari nol.  $t_1$  dan  $t_2$  adalah titik potong kurva dinamika harian gradien iklim mikro dengan garis kesetimbangan termal. Perubahan arah fluks termal dari lingkungan ke dalam hutan dan sebaliknya, menghasilkan dua bidang dinamika gradien; yang satu terletak di atas garis kesetimbangan dan yang lainnya terletak di bawah garis kesetimbangan termal. Persamaan (3-9) digunakan untuk menghitung luas bidang di atas maupun di bawah garis kesetimbangan dengan menyesuaikan batas  $t_1$  dan  $t_2$ . Program komputer dapat menentukan nilai batas tersebut dan langsung mengeluarkan besaran luas bidang dinamika harian gradien iklim mikro.

- p. Penentuan indeks dinamika harian gradien iklim mikro sebagai perbandingan luas bidang dinamika malam hari dengan siang hari. Indeks dinamika harian dapat diperoleh dengan mudah setelah diperoleh data luas bidang dinamika harian gradien iklim mikro. Program komputer dapat secara langsung mengeluarkan data indeks dinamika harian gradien iklim mikro di tepi hutan. Indeks dinamika merupakan besaran tanpa satuan.

### 3.5. Prosedur Simulasi Pengaruh Angin

Kerangka penelitian (Gambar 3.3) dan kerangka operasional penelitian (Gambar 4.1), menyajikan simulasi pengaruh angin terhadap variabel suhu udara dan kelembaban udara. Simulasi pengaruh angin terhadap suhu dan kelembaban udara dikembangkan melalui analisis dan pemodelan data hasil penelitian terdahulu dan data kecepatan angin maksimum di lokasi penelitian. Kecepatan angin yang dianalisis pengaruhnya adalah kecepatan angin dalam batas kecepatan maksimum di lokasi penelitian, dengan arah dari tepi ke dalam hutan. Penetapan arah angin ditujukan untuk menganalisis pengaruh angin terhadap kedalaman efek tepi dan gradien tepi. Fungsi spasial suhu udara dan kelembaban udara masing-masing transek yang dipilih untuk dianalisis, adalah fungsi dengan kedalaman efek tepi paling jauh.

Perubahan spasial kecepatan angin dari tepi ke dalam hutan berbentuk eksponensial (Somerville, 1980; Savil, 1983; Nelson *et al.*, 1994; Laurance *et al.*, 1998; Davies Colley *et al.*, 2000), sehingga pemodelan fungsi spasial pengaruh kecepatan angin mengikuti metode pemodelan yang dikembangkan peneliti (bagian 4.5. butir h). Asumsi-asumsi analisis dan pemodelan adalah sebagai berikut:

- a. Hutan mangrove bersifat semi elastis, dimana penetrasi angin akan bertambah dengan meningkatnya kecepatan hingga batas kecepatan maksimum.
- b. Struktur hutan mangrove homogen dari tepi ke dalam hutan, sehingga koefisien gesekan atau koefisien redaman gaya geser udara dianggap konstan.
- c. Aliran angin non turbulen, arah dan kecepatannya tetap, dari tepi ke dalam hutan.
- d. Tidak terjadi perubahan struktur hutan akibat gaya seret atau energi kinetik angin.

Pemodelan dan analisis untuk simulasi pengaruh angin dilakukan pervariabel (suhu udara dan kelembaban udara), pertransek. Tahapan simulasi pengaruh kecepatan angin adalah sebagai berikut:

- a. Analisis dan pemodelan fungsi koreksi pengaruh kecepatan angin. Fungsi koreksi kecepatan angin ( $k(v)$ ) adalah fungsi yang mengontrol iterasi program komputer hingga batas kedalaman pengaruh angin, sesuai data masukan kecepatan angin. Fungsi ini berbentuk fungsi eksponensial asimtotik yang bertambah dengan bertambahnya kecepatan angin, hingga batas tertentu. Nilai fungsi koreksi maksimum (atau nilai asimtot = 1) merupakan batas kedalaman pengaruh dari kecepatan angin maksimum, dan dipandang sebagai batas elastisitas hutan (asumsi a).
- b. Penentuan fungsi kecepatan angin, sebagai fungsi posisi sepanjang transek dari tepi ke dalam hutan. Fungsi kecepatan angin dimodelkan berdasarkan data:
  - 1) Batas kedalaman pengaruh kecepatan angin yang diperoleh dari prosedur butir a.
  - 2) Nilai-nilai batas atau data yang tersedia dari hasil penelitian. Data tersebut meliputi:
    - a) Data kecepatan angin di tepi (posisi  $x = 0$ ), yang tersedia dalam penelitian ini.
    - b) Data kecepatan angin, atau prosentase kecepatan angin pada posisi tertentu dalam hutan, menggunakan data penelitian terdahulu di hutan. Pemodelan menggunakan data penelitian terdahulu dikarenakan dalam penelitian ini, kecepatan angin pada jarak lebih dari satu meter sama dengan nol.
- c. Digitisasi fungsi spasial suhu (dan kelembaban) hasil pemodelan pada kondisi kecepatan angin sangat rendah, dan fungsi kecepatan angin yang dipilih. Masing-masing fungsi menghasilkan deret eksponensial, dengan jumlah suku yang sama (lebar sampling berbeda). Banyaknya suku ditentukan berdasarkan kedalaman efek tepi maksimum suhu dan kelembaban udara pada kondisi kecepatan angin sangat rendah.
- d. Penentuan fungsi suhu dan kelembaban udara di bawah pengaruh angin. Data masukan yang dibutuhkan adalah: (1) selisih suhu dan kelembaban udara di tepi dengan suhu dan kelembaban udara di luar, (2) suhu dan kelembaban udara di tepi pada saat dicapai kedalaman efek tepi maksimum. Fungsi suhu dan kelembaban udara yang dipengaruhi oleh kecepatan angin, diperoleh melalui jumlah perkalian setiap suku deret suhu (atau kelembaban) dengan suku deret fungsi kecepatan angin yang digeser dengan jarak pergeseran adalah lebar sampling fungsi diskrit kecepatan angin. Iterasi penentuan pengaruh angin terhadap suku deret suhu udara (dan kelembaban), adalah:

$$T_i' = [\sum_{j=1}^m T_i (1+v_j).(1+k_1. \Delta T.x)].k_2.....(3-10)$$

dimana  $T_i'$  adalah nilai suku ke  $i$  dari deret suhu udara yang dipengaruhi angin,  $T_i$  adalah nilai suku ke  $i$  dari deret suhu udara tanpa pengaruh angin,  $v_j$  adalah nilai suku ke  $j$  dari deret kecepatan angin, yang diperkalikan dengan suku ke  $i$  dari deret suhu ( $1 \leq j \leq m$ ),  $m$  adalah banyaknya suku deret fungsi kecepatan.  $\Delta T$  adalah selisih suhu luar dengan suhu tepi pada kondisi tanpa pengaruh angin,  $x$  adalah jarak dari tepi,  $k_1$  adalah koefisien redaman pengaruh angin, dan  $k_2$  adalah faktor koreksi fungsi suhu yang dipengaruhi angin. Faktor koreksi fungsi suhu (dan kelembaban), mengacu pada nilai batas suhu  $T_1' = T_1 + \Delta T$ . Keadaan tanpa angin atau kecepatan angin sangat rendah, berlaku  $v_j = 0$ ,  $\Delta T = 0$ , artinya tanpa angin, selisih suhu udara luar dengan tepi tidak akan mempengaruhi suhu di bawah kanopi. Persamaan (4-10) berlaku untuk semua suku deret dari fungsi diskrit suhu

- udara ( $1 \leq i \leq m$ ). Prosedur dan rumus yang sama digunakan untuk penentuan fungsi kelembaban udara karena pengaruh angin.
- e. Penentuan gradien tepi dan kedalaman efek tepi fungsi suhu dan kelembaban udara yang dipengaruhi angin. Gradien tepi dan kedalaman efek tepi ditentukan menggunakan prosedur yang sama dengan yang dilakukan pada bagian 4.5. butir k dan l.

## BAB IV CONTOH HASIL ANALISIS – PEMODELAN DAN PENENTUAN PARAMETER IKLIM MIKRO

### 4.1. Deskripsi Lokasi dan Kondisi Pengukuran Variabel Iklim Mikro

Bagian ini mendeskripsikan kondisi lokasi dan pengukuran pada sepuluh transek yang dipilih berdasarkan pertimbangan variasi ekotipe mangrove, adanya celah dan tambalan, dan variasi lingkungan berbatasan. Tabel-4.1. menyajikan lokasi, transek pengukuran, ekotipe dan struktur hutan mangrove dan kondisi lingkungan berbatasan dengan ekosistem mangrove.

Tabel 4.1. Kondisi transek pengukuran pada tiga lokasi penelitian

| Lokasi                         | Transek | Ekotipe      | Struktur hutan                                     | % tutupan kanopi | Kondisi luar tepi        |
|--------------------------------|---------|--------------|--|------------------|--------------------------|
| Talen-<br>ngen<br>(1)          | 1       | Fringe       | Homogen, <i>Rhizophora</i> , celah di bagian dalam | 72-85            | Laut, Teluk Miulu        |
|                                | 2       | fringe       | Homogen, <i>Rhizophora</i>                         | 75-85            | sda                      |
|                                | 3       | riverine     | Homogen, <i>Rhizophora</i>                         | 78-88            | Alur sungai              |
| Rata-<br>totok<br>Timur<br>(2) | 1       | Ham-<br>mock | Tambalan di bagian dalam (12 m)                    | 90-95<br>55-70   | Jln aspal, mang          |
|                                | 2       | fringe       | Homogen, <i>Rhizophora</i>                         | 75-80            | Pantai, laut             |
|                                | 3       | basin        | Variasi jenis, tinggi te-<br>gakan, dll            | 40-65            | Pantai bervegetasi, laut |
|                                | 4       | basin        | Variasi jenis, dominasi<br><i>Avicenia</i>         | 35-55            | Pantai, jalan, laut      |
|                                | 5       | scrub        | Variasi jenis, dominasi<br><i>Avicenia</i>         | 50-60            | Pantai belukar           |
| Ara-<br>kan<br>(3)             | 1       | fringe       | Homogen, <i>Rhizophora</i> ,<br>pohon tinggi       | 75-85            | Laut                     |
|                                | 2       | basin        | Variasi jenis, tinggi<br>tegakan dll.              | 55-65            | pantai bervegetasi       |

Data hasil pengukuran suhu udara pada sepuluh transek disajikan pada lampiran

### 4.2. Hasil Analisis dan Pemodelan

#### a. Hasil pemodelan fungsi temporal iklim mikro

Tahapan pemodelan dimulai dari pemodelan fungsi temporal (harian) data hasil pengukuran pada sembilan posisi (Gambar 3.3: kerangka dan tahapan penelitian). Hasil pemodelan matematik perubahan temporal keempat variabel iklim mikro (suhu udara, kelembaban udara, suhu air/tanah dan kuat penerangan) untuk setiap posisi pada sepuluh transek menunjukkan pola yang sama yakni berbentuk sinusoidal. Model matematik perubahan temporal harian adalah:



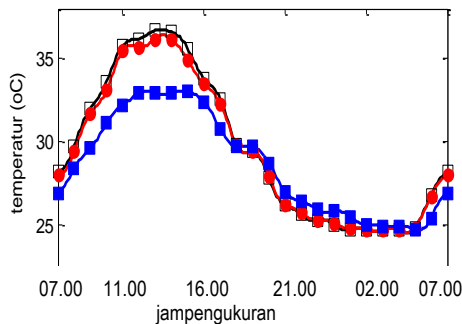
$$F(t) = F_0 + \sum_{m=1}^{N/2} a_m \cos \omega_m t + b_m \sin \omega_m t \dots\dots\dots(4.1)$$

dimana  $F_0$  adalah rata-rata data selama 1 hari,  $m$  adalah cacah harmonik,  $N$  adalah banyaknya data,  $a_m$  dan  $b_m$  adalah koefisien Fourier, dan  $\omega_m = 2\pi m/N$ . Periode fungsi sinusoidal untuk variabel suhu udara, kelembaban udara, dan suhu air/tanah, adalah 24 jam sedangkan untuk variabel kuat penerangan, 12 jam. Banyaknya data hasil pengukuran dengan interval waktu 1 jam untuk variabel suhu udara, kelembaban udara, suhu air/lumpur adalah 24 data, sedangkan untuk variabel kuat penerangan adalah 12 data. Contoh grafik fungsi temporal untuk keempat variabel, masing-masing pada tiga posisi pengukuran diperlihatkan pada Gambar 4.1 s/d Gambar 4.4. Contoh fungsi temporal masing-masing variabel untuk posisi pengukuran di tepi (grafik berwarna merah) adalah:

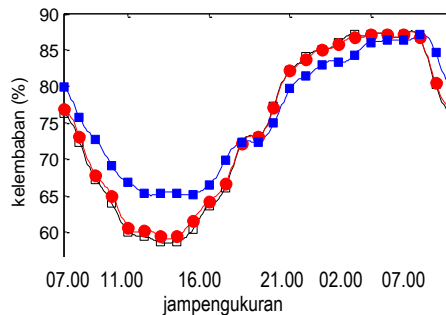
1) Fungsi temporal suhu udara (di tepi, pada transek 2 lokasi desa Talengen):

$$T(t) = 29.3720 - 1.3072.\cos(\pi t)/12 + 5.5511.\sin(\pi t)/12 - 1.0159.\cos(\pi t)/6 - 0.3812.\sin(\pi t)/6 + 0.099.\cos(\pi t)/4 - 0.137.\sin(\pi t)/4 + 0.225.\cos(\pi t)/3 - 0.040.\sin(\pi t)/3$$

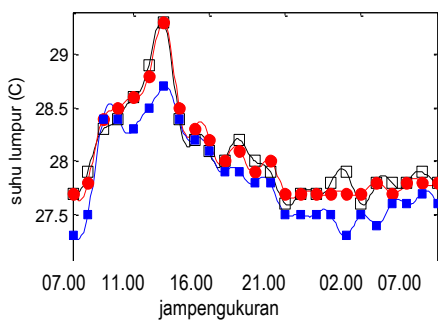
Fungsi  $T(t)$  mengambil empat harmonik pertama dari keseluruhan harmonik (12 harmonik) yang dihasilkan dari 24 pasangan data waktu-suhu. Total sumbangan keragaman fungsi  $T(t)$  untuk empat harmonik pertama adalah 99.3 persen.



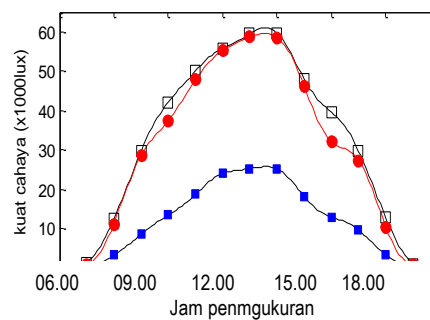
Gambar 4.1. perubahan temporal harian suhu udara di luar (□), di tepi (●) dan di dalam (■) hutan mangrove (transek 2 lokasi desa Talengen)



Gambar 4.2. perubahan temporal harian kelembaban udara di luar (□), di tepi (●) dan di dalam (■) hutan mangrove (transek 2 lokasi desa Talengen)



Gambar 4.3. perubahan temporal harian suhu air/lumpur di luar (□), di tepi (●) dan di dalam (■) hutan mangrove (transek 2 lokasi desa Talengen)



Gambar 4.4. perubahan temporal harian kuat penerangan di luar (□), di tepi (●) dan di dalam (■) hutan mangrove (transek 2 lokasi desa Talengen)

2) Fungsi temporal kelembaban udara (di tepi, pada transek 2 lokasi desa Talengen):

$$H(t) = 74.608 + 3.280.\cos(\pi t)/12 - 13.703.\sin(\pi t)/12 + 1.323.\cos(\pi t)/6 + 0.352.\sin(\pi t)/6 - 0.076.\cos(\pi t)/4 - 0.086.\sin(\pi t)/4 - 0.640.\cos(\pi t)/3 - 0.081.\sin(\pi t)/3$$

Fungsi kelembaban udara  $H(t)$  mengambil empat harmonik pertama dengan total sumbangan keragaman 99.185

3) Fungsi temporal suhu air/tanah (di tepi, pada transek 2 lokasi desa Talengen):

$$T_w(t) = 28.048 - 0.069.\cos(\pi t)/12 + 0.486.\sin(\pi t)/12 - 0.224.\cos(\pi t)/6 - 0.030.\sin(\pi t)/6 - 0.047.\cos(\pi t)/4 - 0.141.\sin(\pi t)/4 + 0.061.\cos(\pi t)/3 + 0.004.\sin(\pi t)/3 - 0.051.\cos(5\pi t)/12 - 0.009.\sin(5\pi t)/12 - 0.008.\cos(\pi t)/2 - 0.070.\sin(\pi t)/2 + 0.083.\cos(7\pi t)/12 - 0.054.\sin(7\pi t)/12 + 0.028.\cos(8\pi t)/12 + 0.045.\sin(8\pi t)/12 - 0.032.\cos(9\pi t)/12 + 0.026.\sin(9\pi t)/12 + 0.003.\cos(10\pi t)/12 - 0.037.\sin(10\pi t)/12 + 0.039.\cos(11\pi t)/12 + 0.073.\sin(11\pi t)/12$$

Fungsi suhu air/tanah  $T_w(t)$  mengambil sebelas harmonik pertama dengan total sumbangan keragaman 99.739 persen. Fungsi suhu air/tanah lebih berfluktuasi dibandingkan dengan suhu udara dan kelembaban udara, sehingga dibutuhkan harmonik yang lebih banyak untuk mendapatkan nilai total sumbangan keragaman melebihi 99%.

4) Fungsi temporal kuat penerangan (di tepi, pada transek 2 lokasi desa Talengen):

$$I(t) = 31.962 - 27.632.\cos(\pi t)/12 - 5.767.\sin(\pi t)/12 - 2.196.\cos(\pi t)/6 - 0.897.\sin(\pi t)/6 - 1.165.\cos(\pi t)/4 - 2.605.\sin(\pi t)/4$$

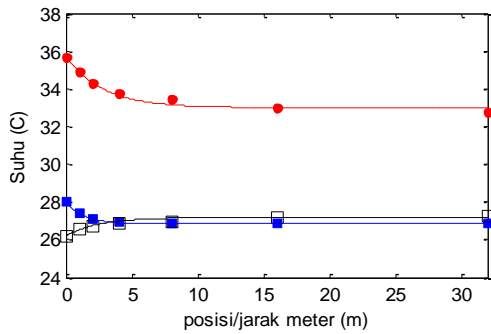
Fungsi kuat penerangan  $I(t)$  mengambil tiga harmonik pertama dari enam harmonik dengan total sumbangan keragaman 99.455 persen.

b. Hasil pemodelan variasi spasial iklim mikro

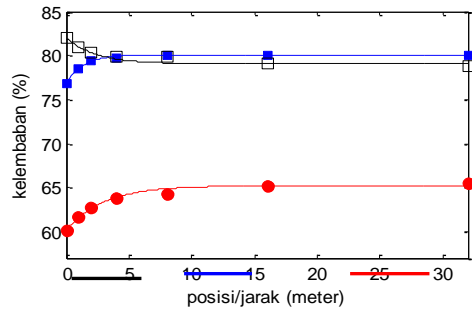
Hasil pemodelan variasi spasial empat variabel iklim mikro menunjukkan pola perubahan spasial yang mengikuti bentuk umum (model) sebagai berikut:

$$F(x) = k_1 + k_2 e^{(k_3 - k_4 x)} \dots\dots\dots(4.2)$$

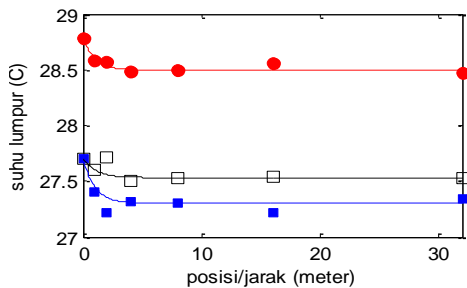
dimana  $k_1, k_2, k_3$  adalah konstanta dan  $k_4$  adalah koefisien fungsi eksponensial yang diperoleh dari hasil pemodelan. Konstanta dan koefisien fungsi spasial ini memiliki tanda positif. Fungsi spasial berubah dari waktu ke waktu sepanjang hari; perubahan tersebut ditandai dengan perubahan besaran dan arah kemiringan (gradien) di batas mangrove. Perubahan besaran dan arah (negatif, positif, atau nol) kemiringan fungsi suhu udara, kelembaban udara, dan suhu air/lumpur, menunjukkan kuantitas dan perubahan arah fluks termal. Perubahan kemiringan fungsi spasial kuat penerangan menunjukkan perubahan kuat penerangan dari waktu ke waktu sepanjang transek. Perubahan besaran dan arah ditunjukkan oleh perbedaan konstanta dan koefisien fungsi spasial  $F(x)$ . Contoh grafik fungsi hasil pemodelan keempat variabel disajikan pada Gambar 4.5 s/d 4.8



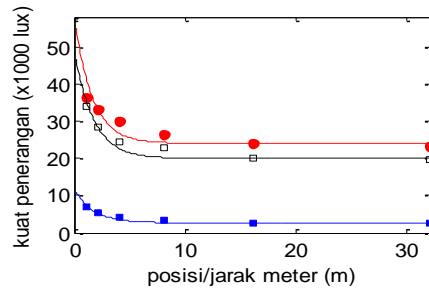
Gambar 4.5. variasi spasial suhu udara jam 07.00 (—■—), 12.00 (—●—) 21.00 (—□—) pada transek 2 lokasi desa Talengen



Gambar 4.6. variasi spasial kelembaban udara jam 07.00 (—■—), 12.00 (—●—) 21.00 (—□—) pada transek 2 lokasi desa Talengen



Gambar 4.7. variasi spasial suhu air/tanah jam 07.00 (—■—), 12.00 (—●—), 21.00 (—□—), transek 2 lokasi desa Talengen



Gambar 4.8. variasi spasial kuat penerangan jam 08.00 (—■—), 12.00 (—●—), 15.00 (—□—), transek 2 lokasi desa Talengen

Contoh fungsi spasial masing-masing variabel untuk jam pengukuran 12.00 (grafik berwarna merah) adalah:

1) Fungsi suhu udara

$$T(x) = 32.99674 + 0.18068.e^{2.70681 - 0.3582.x}$$

2) Fungsi kelembaban udara

$$H(x) = 65.22828 - 775.01073.e^{-5.03622 - 0.33430.x}$$

3) Fungsi suhu air/tanah

$$T_w(x) = 28.49638 + 0.21799.e^{0.29187 - 0.9999.x}$$

4) Fungsi kuat penerangan

$$I(x) = 24.03739 + 1006.10^{-15}.e^{31.06109 - 0.61780.x}$$

c. Model matematik energi termal dalam hutan mangrove dan lingkungan berbatasan.

Fungsi temporal (persamaan 5.1) dan fungsi spasial (persamaan 4.2) menyatakan perubahan variabel iklim mikro dari waktu ke waktu pada setiap posisi sepanjang transek. Perkalian fungsi temporal dan spasial adalah perubahan kondisi termal sepanjang hari pada setiap posisi sepanjang transek

$$F(x,t) = F(x).F(t) = \sum_{m=0}^{N/2} F(x). [a_m \cos \omega_m t + b_m \sin \omega_m t] \dots \dots \dots (4.3)$$

Persamaan (5.3.) merupakan solusi dari persamaan diferensial berbentuk :

$$\frac{\partial F}{\partial x} = k \frac{\partial^2 F}{\partial t^2} \dots\dots\dots(4,4.)$$

Persamaan (5.4) adalah model matematik perubahan energi termal dalam hutan mangrove dan lingkungan berbatasan. Perubahan energi termal ini terjadi karena proses difusi termal yang dinyatakan dalam persamaan (2.6).

Persamaan (2.6) dan solusinya persamaan (2.7), menyatakan proses difusi termal dari sumber tetap atau kondisi batas tetap. Persamaan (2.7) menjelaskan keadaan sesaat dari perubahan termal dalam hutan mangrove dan lingkungan berbatasan. Komponen posisi (x) pada persamaan (2.7) menunjukkan sifat transfer panas berbentuk vibrasi (tumbukan) partikel udara, sedangkan komponen waktu (t) menunjukkan perubahan energi termal pada setiap posisi (bertambah atau berkurang secara eksponensial). Perubahan intensitas radiasi atau kuat penerangan matahari menyebabkan perubahan energi termal pada setiap posisi berbentuk sinusoidal seperti dinyatakan dalam persamaan (5.3). Difusi termal (keadaan sesaat) akibat penyinaran matahari yang dinyatakan oleh persamaan (2.6) menyebabkan perubahan komponen spasial energi termal dalam hutan mangrove dan lingkungan berbatasan berbentuk eksponensial. Perubahan komponen spasial dan temporal (harian) energi termal ini ditunjukkan oleh indikator-indikator iklim mikro: suhu udara, kelembaban udara, suhu air/tanah dan kuat penerangan.

### 4.3. Hasil Pengujian Model

- a. Simpangan data model terhadap data hasil pengukuran. Rataan nilai akar pangkat dua dari kuadrat selisih data model-data ukur masing-masing variabel penelitian untuk sepuluh transek disajikan pada Tabel 4.2. Data pada Tabel 4.2. menunjukkan rata-rata akar pangkat dua dari kuadrat selisih data model – data pengukuran yang relatif rendah dibandingkan dengan rata-rata data hasil pengukuran. Rataan simpangan data model terhadap data hasil pengukuran untuk variabel suhu udara bervariasi antara: 0,317 °C (atau 1 %) hingga 0,405 °C (atau 1,4 %)

Tabel 4.2. Rataan akar pangkat dua dari kuadrat selisih data model – data pengukuran

| Lokasi          | Nomor Transek | Rataan simpangan data model variabel ..... |                     |                    |                      |
|-----------------|---------------|--|---------------------|--------------------|----------------------|
|                 |               | Suhu udara (°C)                            | Kelembaban udara(%) | Suhu air/tanah(°C) | Kuat penerangan(lux) |
| Talengen        | 1             | 0.404                                      | 0.970               | 0.128              | 3.082                |
|                 | 2             | 0.391                                      | 0.972               | 0.083              | 3.070                |
|                 | 3             | 0.375                                      | 0.936               | 0.100              | 3.021                |
| Ratatotok Timur | 1             | 0.405                                      | 0.968               | 0.093              | 3.095                |
|                 | 2             | 0.379                                      | 0.944               | 0.104              | 3.113                |
|                 | 3             | 0.377                                      | 0.956               | 0.093              | 2.809                |
|                 | 4             | 0.376                                      | 0.955               | 0.078              | 2.914                |
|                 | 5             | 0.360                                      | 0.968               | 0.112              | 2.836                |
| Arakan          | 1             | 0.396                                      | 0.973               | 0.082              | 3.086                |
|                 | 2             | 0.317                                      | 0.854               | 0.124              | 2.797                |

Rataan simpangan data model terhadap data hasil pengukuran untuk variabel kelembaban udara atau kelembaban relatif bervariasi antara: 0,854% (atau 1,2 % terhadap rata-rata data hasil pengukuran kelembaban udara) hingga 0,405 °C (atau 1,4 % terhadap rata-rata data hasil pengukuran kelembaban udara). Rataan simpangan data model terhadap data hasil pengukuran untuk variabel suhu air/tanah bervariasi antara: 0,078 °C (atau 0,8 %) hingga 0,128 °C (atau 0,5 %). Rataan simpangan data model terhadap data hasil pengukuran untuk kuat penerangan bervariasi antara: 2.797 lux (atau 7 %) hingga 3.113 lux (atau 7,7 %). Nilai rata-rata simpangan data model menunjukkan bahwa fungsi dan data hasil pemodelan cukup teliti untuk digunakan dalam penentuan parameter iklim mikro dan karakterisasi iklim mikro hutan mangrove.

b. Prediksi data pada posisi 32 m dan 64 m.

Hasil prediksi data suhu udara, kelembaban udara, suhu air/tanah dan kuat penerangan pada posisi 32 meter untuk sepuluh transek dan hasil prediksi data suhu udara dan kelembaban udara pada posisi 64 m untuk transek 2 lokasi 1 dan transek 3 lokasi 2 disajikan pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 Rataan simpangan data model terhadap data pengukuran pada posisi 32 m dan 64 m dari tepi.

| Lokasi          | No. Transek | Simpangan data model terhadap data ukur pada posisi 32 m dan 64 m untuk variabel ..... |       |                      |       |                     |                       |
|-----------------|-------------|--|-------|----------------------|-------|---------------------|-----------------------|
|                 |             | Suhu udara (°C)  |       | Kelembaban udara (%) |       | Suhu air/tanah (°C) | Kuat penerangan (lux) |
|                 |             | 32 m   | 64 m  | 32 m                 | 64 m  | 32 m                | 32 m                  |
| Talengen        | 1           | 0.004  |       | 0.096                |       | 0.089               | 0.137                 |
|                 | 2           | 0.092  | 0.154 | 0.190                | 0.183 | 0.042               | 0.105                 |
|                 | 3           | 0.080  |       | 0.177                |       | 0.032               | 0.097                 |
| Ratatotok Timur | 1           | 0.053  |       | 0.122                |       | 0.053               | 0.718                 |
|                 | 2           | 0.071  |       | 0.180                |       | 0.180               | 0.485                 |
|                 | 3           | 0.053  | 0.161 | 0.120                | 0.137 | 0.048               | 0.515                 |
|                 | 4           | 0.053  |       | 0.121                |       | 0.062               | 0.367                 |
|                 | 5           | 0.044  |       | 0.118                |       | 0.035               | 0.510                 |
| Arakan          | 1           | 0.078  |       | 0.173                |       | 0.037               | 0.135                 |
|                 | 2           | 0.048  |       | 0.126                |       | 0.051               | 0.461                 |

Simpangan prediksi data model terhadap data pengukuran pada posisi 32 m dan 64 m, menunjukkan bahwa pemodelan spasial yang dikonstruksi dari tiga data (posisi 0 (tepi), 1 m dan 2 m dari tepi ke arah hutan) dan dikontrol menggunakan data dari tiga posisi lainnya yang dekat dengan tepi hutan (posisi 4 m, 8 m, dan 16 m) dapat digunakan untuk memprediksi besaran variabel iklim mikro pada posisi yang lebih jauh ke tengah hutan. Hasil ini menunjukkan bahwa teknik pengukuran pada posisi berjarak logaritmik dari tepi dan metode pemodelan yang dikembangkan, menjamin efisiensi pengukuran karena tidak perlu melakukan pengukuran hingga jauh ke tengah hutan. Hal ini berlaku pada kondisi hutan dimana tidak terjadi fluktuasi energi yang besar sepanjang transek (asumsi tunak).

#### 4.4. Hasil Analisis dan Pengembangan Parameter Iklim Mikro

Parameter iklim mikro adalah ukuran numerik variabel: suhu udara, kelembaban udara, suhu air/tanah dan kuat penerangan sebagai karakteristik ekosistem mangrove dan interaksinya (termal) dengan lingkungan berbatasan. Parameter iklim mikro ini memberikan informasi khusus tentang kondisi iklim mikro ekosistem mangrove dan lingkungan berbatasan, dan perubahannya sepanjang hari. Deskripsi hasil analisis dan pengembangan parameter iklim mikro melalui prosedur pemodelan matematik data lapangan adalah sebagai berikut:

- a. Fungsi dan grafik hasil pemodelan temporal variabel iklim mikro.  
Contoh fungsi dan grafik perubahan temporal, hasil pemodelan matematik disajikan pada Gambar 4.1 s/d 4.4. Data atau informasi yang dapat diperoleh dari luaran program komputer adalah:
  - 1) Data variabel iklim mikro pada sembarang waktu dalam selang waktu 24 jam pengukuran. Data variabel iklim mikro diperoleh dengan cara memasukkan data waktu ( $t$ ) ke dalam fungsi temporal  $F(t)$ .
  - 2) Grafik fungsi temporal, menunjukkan pola perubahan temporal variabel iklim mikro yang sama, namun berbeda amplitudo antar posisi sepanjang transek. Perbedaan amplitudo menunjukkan perbedaan kuantitas energi cahaya (untuk variabel kuat penerangan) dan kuantitas energi termal (untuk variabel suhu udara, kelembaban udara, suhu air.tanah) pada masing-masing posisi.
  - 3) Identifikasi awal mengenai waktu perubahan arah fluks termal antara lingkungan dengan ekosistem mangrove. Waktu peralihan arah fluks termal dapat diidentifikasi dari perpotongan kurva fungsi temporal variabel iklim mikro (suhu udara, kelembaban udara) untuk posisi tepi dan posisi dalam hutan ( $32$  m dari tepi).
- b. Fungsi dan grafik hasil pemodelan spasial variabel iklim mikro.  
Contoh fungsi dan grafik fungsi spasial hasil pemodelan disajikan pada Gambar 5.5 s/d 5.8. Data dan informasi yang dapat diperoleh dari fungsi dan grafik fungsi spasial adalah:
  - 1) Data variabel iklim mikro pada sembarang posisi sepanjang transek, dari tepi ke dalam hutan. Data model diperoleh dengan cara memasukkan data posisi ( $x$ ) ke dalam fungsi spasial  $F(x)$ .
  - 2) Informasi awal tentang arah difusi termal berdasarkan kelengkungan fungsi spasial di sekitar tepi. Data perubahan arah difusi termal diperoleh dari parameter gradien tepi.
- c. Parameter nilai maksimum dan nilai minimum.  
Parameter nilai maksimum dan minimum menunjukkan fluktuasi harian variabel iklim mikro sebagai karakteristik ekosistem mangrove dan lingkungan berbatasan. Parameter nilai maksimum dan minimum diperoleh dari nilai ekstrim fungsi temporal.

Parameter nilai maksimum variabel: suhu udara, kelembaban udara, dan kuat penerangan, berbeda antar transek (Tabel 5.8, 5.9, 5.10). Perbedaan nilai maksimum dan minimum suhu air/tanah antar transek relatif kecil. Parameter nilai maksimum dan minimum mengkarakterisasi ekosistem mangrove dan lingkungan berbatasan. Keunggulan penentuan data parameter nilai maksimum dan minimum melalui fungsi temporal hasil pemodelan matematik, adalah perolehan nilai maksimum dan minimum yang tidak terjadi pada waktu atau jam pengukuran.

- d. Parameter selisih maksimum besaran variabel iklim mikro antara tepi dengan interior hutan.

Penentuan selisih maksimum besaran variabel iklim mikro di tepi dengan interior hutan, dijelaskan pada Lampiran 2 butir 6. Data pada Tabel 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 menunjukkan selisih maksimum besaran variabel iklim antar tepi dengan interior hutan yang berbeda antar transek. Berdasarkan nilai selisih maksimum, terdapat kecenderungan pengelompokan transek sesuai kondisi ekosistem dan lingkungan berbatasan. Transek berbatasan dengan laut terbuka (mangrove tipe *fringe*) dengan tutupan kanopi lebih lebat, menunjukkan selisih maksimum variabel iklim mikro yang lebih tinggi dibanding transek berbatasan dengan pantai (tanpa vegetasi atau bervegetasi). Pengaruh celah dalam hutan mangrove juga teridentifikasi melalui besaran selisih maksimum suhu udara, kelembaban udara, kuat penerangan, dan suhu air/tanah antara tepi dengan interior hutan. Parameter selisih maksimum besaran variabel iklim mikro antara tepi dengan interior hutan yang ditentukan dari fungsi temporal, dapat mengkarakterisasi iklim mikro hutan mangrove.

- e. Kedalaman efek tepi.

Metode penentuan parameter kedalaman efek tepi yang dikembangkan melalui pemodelan matematik, didasarkan pada nilai fungsi gradien mendekati atau sama dengan nol (Bab IV, bagian 4.5, butir k). Keunggulan penentuan parameter kedalaman efek tepi berdasarkan fungsi gradien iklim mikro adalah:

- 1) Efisiensi pengukuran, dimana posisi pengukuran ditentukan berdasarkan jarak logaritmik, dengan jarak paling jauh 16 – 32 m dari tepi. Banyaknya posisi pengukuran antara enam hingga 10 posisi. Fungsi model semakin valid apabila posisi (data) pengukuran yang dijadikan kontrol pemodelan, semakin banyak. Fungsi hasil pemodelan dapat menentukan kedalaman efek tepi dan besaran iklim mikro pada posisi jauh ke tengah hutan, melewati posisi pengukuran sepanjang transek.
- 2) Ketepatan penentuan batas pengaruh iklim mikro lingkungan. Program komputer secara langsung menentukan jarak dari tepi untuk nilai gradien sama atau mendekati nol. Jarak tersebut diperoleh dari fungsi gradien sebagai turunan pertama fungsi spasial terhadap jarak. Penentuan kedalaman efek tepi yang dikembangkan disini, berbeda dengan penentuan parameter kedalaman efek tepi yang didasarkan pada data hasil pengukuran pada dua posisi berurutan. Penetapan kedalaman efek tepi berdasarkan kesamaan data hasil pengukuran pada dua posisi berurutan, berpotensi mengalami bias yang besar apabila posisi pengukuran berjauhan.
- 3) Variasi kedalaman pengaruh iklim mikro lingkungan yang berubah sepanjang hari. Ketepatan kedalaman efek tepi (sebagai kedalaman maksimum pengaruh iklim mikro lingkungan), kurang terjamin apabila parameter ini ditentukan secara langsung dari data hasil pengukuran dengan interval waktu yang besar. Fungsi gradien yang dihasilkan

melalui pemodelan fungsi temporal dan fungsi spasial, dapat diperoleh untuk sembarang waktu ( $t$ ), sehingga data kedalaman pengaruh iklim mikro lingkungan dapat diperoleh dalam jumlah banyak, sesuai interval sampling (waktu) yang ditentukan. Program komputer melakukan seleksi dan menampilkan kedalaman maksimum pengaruh lingkungan terhadap perubahan iklim mikro hutan mangrove.

f. Gradien tepi.

Gradien tepi merupakan parameter baru yang dirumuskan peneliti untuk mendeskripsikan interaksi termal antara hutan mangrove dengan lingkungan. Gradien tepi adalah nilai tertinggi fungsi gradien di tepi atau pada posisi  $x = 0$ . Nilai gradien di tepi berubah sepanjang hari, dan gradien tepi yang digunakan untuk mengkarakterisasi ekosistem mangrove adalah nilai gradien tepi tertinggi. Keunggulan parameter gradien tepi adalah kepekaan terhadap perubahan emisi termal yang terjadi di lingkungan berbatasan dengan hutan mangrove (dibandingkan dengan gradien tepi – interior yang digunakan peneliti sebelumnya). Parameter gradien tepi dapat membedakan difusi termal antara hutan mangrove dengan lingkungan menurut perbedaan kondisi lingkungan dan kondisi ekosistem mangrove, terutama tutupan kanopi dan adanya celah atau tambalan. Nilai gradien tepi nol menunjukkan kondisi kesetimbangan termal antara ekosistem mangrove dengan lingkungan. Kondisi kesetimbangan termal adalah kondisi dimana tidak terjadi aliran atau fluks termal dari lingkungan ke dalam hutan atau sebaliknya.

g. *Time lag* perubahan kuat penerangan dengan perubahan variabel iklim mikro lainnya.

Parameter *time lag* dikembangkan dari penelitian terdahulu, melalui pemodelan temporal variabel iklim mikro. Penentuan parameter *time lag* menggunakan prosedur yang dijelaskan pada bab III. Data *time lag* perubahan kuat penerangan dengan perubahan suhu udara (Tabel 4.9) dan *time lag* perubahan kuat penerangan dengan perubahan kelembaban udara (Tabel 4.10) menunjukkan kemiripan pola perubahan *time lag* dari tepi ke dalam hutan. Data *time lag* pada Tabel 4.9 dan 4.10 dapat menunjukkan proses difusi termal dari lingkungan ke dalam hutan. Nilai *time lag* pada posisi dekat tepi lebih kecil dibanding *time lag* pada posisi yang lebih jauh ke tengah hutan. Perbedaan ini menunjukkan bahwa pada posisi dekat tepi, udara atau air mengalami peningkatan energi termal lebih dahulu dan lebih besar karena pengaruh penyinaran matahari. Ini berarti difusi termal akibat penyinaran matahari berlangsung dari lingkungan ke dalam hutan. *Time lag* juga menunjukkan perbedaan antara hutan mangrove yang utuh dengan yang ada celah atau tambalan. *Time lag* antara kuat penerangan dengan suhu air/tanah (Tabel 5.14) menunjukkan variasi yang kompleks antar posisi sepanjang transek. Perubahan dan variasi spasial *time lag* antara kuat penerangan dengan suhu air/tanah turut dipengaruhi aktivitas pasut yang mengalirkan massa air dengan suhu berbeda-beda.

h. Luas bidang dinamika harian gradien iklim mikro.

Parameter luas bidang dinamika harian gradien iklim mikro adalah parameter baru yang dirumuskan peneliti untuk mengkarakterisasi interaksi ekosistem mangrove dengan lingkungan, selama satu hari. Parameter luas bidang dinamika harian dan indeks dinamika harian gradien iklim mikro merupakan parameter terakhir yang ditentukan melalui prosedur pemodelan matematik. Parameter luas bidang dinamika harian gradien suhu udara, kelembaban udara dan suhu air/tanah bersesuaian dalam menunjukkan perbedaan



ekosistem mangrove. Parameter luas bidang dinamika harian gradien suhu air/tanah dapat memberikan informasi kondisi harian iklim mikro hutan mangrove, walaupun nilai parameter kedalaman efek tepi dan gradien tepi berfluktuasi kompleks.

i. Indeks dinamika harian gradien iklim mikro.

Parameter indeks dinamika harian gradien iklim mikro merupakan satu kesatuan dengan parameter luas bidang dinamika harian gradien iklim mikro. Indeks dinamika harian gradien iklim mikro dapat menunjukkan kapasitas ekosistem mangrove mereduksi pengaruh peningkatan energi termal lingkungan pada siang hari dan mengendalikan pelepasan energi ke lingkungan pada malam hari. Parameter ini dapat memberikan informasi dini tentang perubahan kondisi ekosistem karena pengaruh perubahan energi termal ekstrim di lingkungan berbatasan.

#### **4.5. Sistem Data Parameter Iklim Mikro**

Sistem data parameter iklim mikro adalah seperangkat nilai parameter kuantitatif dari variabel iklim mikro yang mengkarakterisasi iklim mikro ekosistem mangrove dan lingkungan berbatasan. Sistem data parameter iklim mikro meliputi semua parameter yang dibahas pada butir 5.4. Sistem data ini menunjukkan nilai parameter iklim mikro yang berbeda antar transek (butir 5.6). Analisis nilai parameter iklim mikro antar transek, menunjukkan bahwa nilai parameter iklim mikro bersifat khas untuk setiap ekosistem. Nilai parameter iklim mikro berbeda, bergantung pada kondisi lingkungan berbatasan, kerapatan kanopi mangrove, adanya celah dan fragmen. Hasil analisis ini menunjukkan bahwa sistem data parameter iklim mikro dapat digunakan untuk memantau perubahan struktur hutan mangrove (pertumbuhan, kerusakan struktur atau kanopi, perombakan area) dan dampak perubahan kondisi termal lingkungan (pembukaan pabrik, peningkatan suhu global).

Sistem data parameter iklim mikro dapat digunakan untuk mengelompokkan transek berdasarkan kesesuaian urutan nilai antar variabel iklim mikro (hasil analisis korelasi tata jenjang), dan selisih nilai antar transek (butir 5.6.b). Transek yang selisih nilainya kecil menunjukkan kondisi ekosistem dan lingkungan yang sama atau hampir sama dalam hal respons termal terhadap penyinaran matahari. Rentang nilai yang dijadikan dasar pengelompokan ekosistem dapat dijadikan kriteria fisis variasi ekosistem hutan mangrove. Kriteria fisis ini dibutuhkan dalam kebijakan pengelolaan area hutan mangrove, dan dapat dijadikan acuan evaluasi dan pemantauan kondisi hutan mangrove. Contoh sistem data parameter iklim mikro untuk transek 2 lokasi desa Talengen disajikan pada Tabel 4.4. Nilai parameter iklim mikro yang disajikan pada Tabel 4.4 adalah nilai parameter pada kondisi pengukuran: tidak ada hujan, kecepatan angin rendah, pada bulan kuartir. Nilai parameter ini berbeda jika kondisi atmosfer dan hidrodinamika berbeda. Nilai harian parameter iklim mikro untuk setiap ekosistem mangrove merupakan rentang nilai sesuai kondisi atmosfer dan hidrodinamika. Rentang nilai parameter iklim mikro menurut kelompok ekosistem mangrove (berdasarkan ekotipe mangrove, kondisi lingkungan, struktur hutan mangrove (adanya celah atau fragmen), kerapatan kanopi), dengan variasi kondisi atmosfer dan hidrodinamika, dapat ditentukan menggunakan model matematik dan program komputer yang dihasilkan dalam penelitian ini.

Tabel 4.4. Sistem data parameter iklim mikro

| Parameter iklim mikro   | Nilai/ waktu | Variabel iklim mikro |                  |                      |                             |
|---|--------------|----------------------|------------------|----------------------|-----------------------------|
|   |              | Suhu udara ( °C)     | Kelemb udara (%) | Suhu air/tanah ( °C) | Kuat penerangan (x 100 lux) |
| Nilai harian tertinggi dan waktunya (jam, menit)                | Nilai        | 36,7                 | 87,00            | 29,3                 | 597                         |
|   | waku         | 13.00                | 01.00            | 13.00                | 12.00                       |
| Nilai terendah dan waktunya (jam, menit)                        | Nilai        | 24,7                 | 58,6             | 27,3                 | 0,210                       |
|   | waku         | 01.00                | 13.00            | 01.00                | 18.00                       |
| Selisih maks. Tepi-interior                                     | Nilai siang  | 3,8                  | 5,900            | 0,60                 | 33,5                        |
|   | Nilai mlm    | 0,8                  | 2,700            | 0,40                 | 12,00                       |
| Waktu peralihan difusi termal (jam, menit) berdasarkan variabel | Pertama      | 18.6                 | 18.6             | *                    | -                           |
|   | kedua        | 04.48                | 04.54            | *                    | -                           |
| Kedalaman efek tepi siang hari (m) & waktunya                   | Nilai        | 44,6                 | 50,04            | 12,9                 | 25,83                       |
|   | Waku         | 13.00                | 13.00            | 13.00                | 12.00                       |
| Kedalaman efek tepi malam hari (m) & waktunya                   | nilai        | 24,36                | 31,09            | 10,9                 | -                           |
|   | Waktu        | 02.00                | 02.00            | 23.00                | -                           |
| Gradien tepi tertinggi pada siang hari                          | Nilai        | 1,4                  | 2,452            | -0,63                | 20,03                       |
|   | Waktu        | 11.12                | 11.12            | 12.54                | 12.18                       |
| Gradien tepi tertinggi pada malam hari                          | Nilai        | 0,524                | 1,78             | ***                  | -                           |
|   | Waktu        | 24.36                | 24.30            | **                   | -                           |
| Luas bidang dinamika harian gradien                             | Nilai siang  | 9,696                | 20,01            | 4,903                | 163,6                       |
|   | Nilai mlam   | 3,14                 | 10,03            | 0,024                | -                           |
| Indeks dinamika gradien   | nilai        | 0,324                | 0,501            | 0,005                | -                           |

Catatan: \*) terjadi lebih dua kali perubahan tanda gradien yang menandakan arah difusi termal

\*\*\*) hanya terjadi perubahan sesaat kemudian kembali pada arah gradien sebelumnya

\*\*\*\*) ada beberapa nilai gradien yang hampir sama dengan gradien maksimum

#### 4.6. Analisis Komparatif Antar Transek

##### a. Analisis komparatif berdasarkan parameter iklim mikro

Bagian ini menyajikan rangkuman analisis dan pemodelan data parameter iklim mikro untuk sepuluh transek penelitian. Interpretasi dan deskripsi hasil penelitian dilakukan secara

komparatif untuk mengevaluasi apakah parameter kuantitatif dapat menunjukkan karakteristik iklim mikro ekosistem dan interaksinya dengan lingkungan.

1) Variabel suhu udara

Rangkuman hasil pemodelan dan analisis parameter suhu udara disajikan pada Tabel 5.8. Pemodelan fungsi suhu udara menghasilkan fungsi temporal berbentuk sinusoidal dan fungsi spasial berbentuk eksponensial. Pola perubahan temporal dan spasial ini, sama dengan hasil penelitian iklim mikro hutan oleh beberapa peneliti terdahulu (Chen *et al.*, 1993a; Davies-Colley *et al.*, 2000; Saunders *et al.*, 2003; Spittlehouse *et al.*, 2004; Saxena, 2007). Fungsi temporal harian memiliki periode 24 jam, dengan fluktuasi yang lebih besar pada siang hari, dan kecil pada malam hari. Fluktuasi suhu yang besar pada siang hari disebabkan hutan dan lingkungan berbatasan, mendapat penyinaran matahari secara langsung, sedangkan pada malam hari, energi yang mengendalikan perubahan suhu udara hanya energi yang tersimpan dari hasil penyinaran selama siang hari (Oliphant *et al.*, 2004). Pola perubahan temporal suhu udara mulai naik sekitar jam 05.00, mencapai puncak sekitar jam 13.00 kemudian turun terjal hingga jam 18.00. Laju penurunan suhu udara semakin kecil setelah jam 18.00 dan hampir stabil antara jam 23.00 hingga 04.00. Suhu udara naik kembali sekitar jam 04.30 – 05.00. Pola perubahan suhu udara ini, sama untuk posisi di luar, di tepi dan dalam hutan mangrove, namun dengan amplitudo dan laju perubahan yang berbeda. Suhu udara tertinggi lebih dari 36 °C, terjadi di tepi mangrove yang berbatasan dengan laut terbuka, seperti pada transek 1, 2, dan 3, lokasi 1 dan transek 1 lokasi 3. Suhu udara melebihi 36 °C juga terjadi pada batas mangrove dengan jalan aspal (transek 1 lokasi 2). Suhu udara pada batas mangrove dengan laut (transek 2 lokasi 2) agak rendah, yakni 35,8 °C. Transek ini berbatasan dengan laut, dilingkari pantai yang ditumbuhi belukar (jarang). Air laut masuk ke batas mangrove melalui saluran dengan lebar sekitar 25 m (saat air surut), dan 80 m saat air pasang.

Hutan mangrove yang berbatasan dengan pantai ditumbuhi belukar dan atau pohon besar tapi jarang, suhu udara maksimumnya sama yakni 34,6 °C (transek 3 dan 4 lokasi 2). Suhu udara maksimum terendah terjadi di batas mangrove dengan pantai yang ditumbuhi pohon dengan kanopi yang cukup rapat (transek 5 lokasi 2, dan transek 2 lokasi 3). Suhu udara harian paling rendah di tepi mangrove terjadi pada malam hari. Suhu udara di batas mangrove dengan laut, paling rendah 24,7 °C, sedangkan di batas mangrove dengan pantai bervegetasi (belukar atau pepohonan) paling rendah 24,00 °C. Suhu udara paling rendah di batas mangrove dengan jalan aspal 24,7 °C, sama dengan suhu udara pada batas mangrove dengan laut

Selisih tertinggi suhu udara di tepi dengan posisi 32 m dalam hutan mangrove, bervariasi antar transek dan menunjukkan perbedaan signifikan. Selisih suhu udara siang hari menunjukkan rentang yang hampir sama dengan hasil penelitian Spittlehouse *et al* (2004) yang mencatat suhu udara dalam hutan 2 – 4 °C lebih dingin dibanding lahan terbuka. Hasil ini lebih rendah dibanding hasil penelitian Williams-Linera (1990), Young and Mitchell (1994), Cadenasso *et al.* (1997), Brosofske *et al.* (1997); Potter *et al.* (2001). Peneliti-peneliti tersebut mencatat perbedaan maksimum suhu udara siang hari untuk ketinggian 1,5 – 2 m di atas tanah, bervariasi antara 3 hingga 6 °C atau lebih. Hasil penelitian menunjukkan suhu udara malam hari dalam hutan mangrove 0,5 – 0,8 °C lebih panas dari suhu di tepi. Selisih suhu maksimum ini lebih rendah dibanding hasil penelitian Chen *et al.* (1995), yang mencatat suhu udara malam hari di dalam hutan 1 °C lebih panas dari lahan terbuka. Hasil ini berbeda dengan Moore *et al.* (2005) yang mengemukakan bahwa waktu malam, suhu pada bagian tepi sama dengan bagian dalam hutan.

Tabel 4.5. Rangkuman hasil pemodelan dan analisis penentuan parameter untuk variabel suhu udara

| Parameter  |            | Parameter kuantitatif suhu udara, menurut lokasi penelitian dan transek |       |       |                 |       |       |       |       |        |       |
|--|------------|---|-------|-------|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|  |            | Talengen  |       |       | Ratatotok Timur |       |       |       |       | Arakan |       |
|  |            | 1   | 2     | 3     | 1               | 2     | 3     | 4     | 5     | 1      | 2     |
| Suhu udara tertinggi ( $^{\circ}\text{C}$ ) dan waktunya (jam, menit)          | Suhu       | 36,4  | 36,7  | 36,3  | 36,3            | 35,8  | 34,6  | 34,6  | 33,00 | 36,7   | 33,5  |
|  | Jam        | 13.00   | 13.00 | 13.00 | 13.00           | 13.00 | 13.00 | 13.00 | 13.00 | 13.00  | 13.00 |
| suhu udara terendah ( $^{\circ}\text{C}$ ) dan waktunya (jam, menit)           | Suhu       | 24,7  | 24,7  | 24,7  | 24,7            | 24,7  | 24,00 | 24,00 | 24,00 | 24,7   | 24,00 |
|  | Jam        | 01.00   | 01.00 | 01.00 | 01.00           | 01.00 | 03.00 | 03.00 | 03.00 | 01.00  | 03.00 |
| Selisih maks. suhu udara di tepi & dalam hutan mangrove ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Siang hari | 2,3   | 3,8   | 3,3   | 2,2             | 3,6   | 1,8   | 1,2   | 2,2   | 3,8    | 1,9   |
|  | Malam hari | 0,5   | 0,8   | 0,8   | 0,7             | 0,8   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,8    | 0,5   |
| Waktu peralihan difusi termal (jam, menit) berdasarkan suhu udara              | Pertama    | 18.12   | 18.6  | 18.18 | 17.24           | 17.32 | 17.48 | 17.54 | 17.42 | 18.06  | 17.24 |
|  | Kedua      | 04.54   | 04.48 | 04.58 | 04.58           | 04.58 | 04.18 | 04.18 | 04.24 | 05.15  | 05.24 |
| Kedalaman efek tepi siang hari (m) & waktu terjadinya (jam, menit)             | Jarak      | 38,13   | 44,6  | 46,34 | 28,39           | 33,4  | 22,11 | 33,53 | 28,58 | 42,00  | 27,54 |
|  | waktu      | 11.00   | 13.00 | 11.00 | 12.00           | 13.00 | 11.00 | 10.00 | 11.00 | 13.00  | 11.00 |
| Kedalaman efek tepi malam hari (m) & waktu terjadinya (jam, menit)             | Jarak      | 22,7  | 24,36 | 27,9  | 23,91           | 22,75 | 20,73 | 21,72 | 20,86 | 27,40  | 20,07 |
|  | Malam hari | 24.00   | 02.00 | 21.00 | 24.00           | 24.00 | 24.00 | 24.00 | 02.00 | 02.00  | 03.00 |
| Gradien tepi tertinggi ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ) pada siang hari         | Gradien *  | 1,053   | 1,4   | 1,087 | 1,297           | 1,747 | 1,077 | 0,902 | 0,916 | 1,38   | 1,018 |
|  | Waktu      | 12.18   | 11.12 | 12.54 | 12.54           | 12.12 | 10.42 | 10.36 | 10.42 | 11.06  | 13.54 |
| Gradien tepi tertinggi ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ) pada malam hari         | Gradien    | 0,491   | 0,524 | 0,482 | 0,482           | 0,494 | 0,44  | 0,456 | 0,342 | 0,504  | 0,364 |
|  | Waktu      | 20.42   | 24.36 | 24.36 | 22.42           | 22.24 | 21.30 | 21.30 | 01.30 | 24.36  | 21.36 |
| Luas bidang dinamika gradien ( $^{\circ}\text{C}.\text{jam}/\text{m}$ )        | Siang hari | 9,088   | 9,696 | 9,967 | 8,994           | 9,399 | 7,828 | 7,305 | 7,436 | 9,688  | 8,660 |
|  | Malam hari | 3,017   | 3,14  | 3,07  | 2,843           | 3,134 | 2,747 | 2,738 | 2,51  | 3,172  | 2,722 |
| Indeks dinamika gradient   |            | 0,332   | 0,324 | 0,308 | 0,316           | 0,333 | 0,351 | 0,375 | 0,338 | 0,327  | 0,314 |

Catatan: \* tanda gradien negatif

Transek yang menunjukkan selisih suhu hampir sama (siang maupun malam hari) adalah transek 2 dan transek 3 lokasi 1, transek 2 lokasi 2 dan transek 1 lokasi 3. Tiga diantara keempat transek (kecuali transek 3 lokasi 1) termasuk ekotipe *fringe* yang berbatasan dengan laut. Transek 3 lokasi 1 termasuk ekotipe *riverine*. Kondisi vegetasi keempat transek juga hampir sama, ditumbuhi satu jenis mangrove yakni *Rhizophora*, dengan tutupan kanopi lebih dari 72 %. Hasil interpretasi komparatif yang menarik terlihat antara keempat transek tersebut di atas, dengan transek 1 lokasi 1. Transek 1 lokasi 1 juga memotong batas mangrove dengan laut, dan ditumbuhi satu jenis mangrove (*Rhizophora*), namun selisih suhu udara siang maupun malam hari berbeda signifikan dengan transek 2 dan transek 3, lokasi 1. Kondisi fisis yang menyebabkan perbedaan tersebut adalah lebar hutan dan adanya celah terbuka yang tergenang air laut pada bagian belakang transek 1. Lebar hutan mangrove di transek 1 hanya berkisar 68 m, dan di bagian belakang terdapat celah atau ruang terbuka yang lebarnya sekitar 30 m. Selisih suhu udara yang rendah pada transek 1, siang maupun malam hari, diduga disebabkan oleh difusi energi termal dua arah yang melewati batas mangrove dengan laut di bagian depan, dan batas mangrove dengan laut di bagian belakang.

Perbandingan selisih suhu udara tepi dengan interior hutan (jarak 32 m dari tepi), antara transek 1 dan transek 2 lokasi 2, menunjukkan bahwa selisih suhu udara tepi – interior siang hari pada transek 2 (3,6 °C), lebih tinggi daripada transek 1 (2,2 °C). Transek 1 lokasi 2 termasuk ekotipe *hammock*, berbatasan dengan jalan aspal, dan terdapat tambalan pada jarak sekitar 12 m dari tepi berbatasan dengan jalan aspal. Kerapatan kanopi pada bagian depan 90 - 95 %, dan pada bagian belakang 55 – 70 %. Transek 2 lokasi 2 termasuk ekotipe *fringe* dengan kerapatan kanopi 75 – 80 %, lebih rendah dari kerapatan kanopi tambalan bagian depan pada transek 1 lokasi 2. Selisih suhu udara tepi-interior yang rendah pada transek 1 lokasi 2 dapat diduga disebabkan oleh tambalan yang tutupan kanopinya renggang, walaupun bagian depan sangat rapat. Kanopi renggang menyebabkan emisi termal yang tinggi (karena menerima radiasi matahari lebih besar) di bawah kanopi sehingga selisih suhu udara pada posisi 32 m dengan suhu udara di tepi menjadi rendah. Selisih suhu udara tepi - interior pada transek 2 lokasi 2 cukup tinggi karena tutupan kanopi mangrove sepanjang transek homogen dan cukup rapat. Dampak tambalan terhadap variasi suhu udara, sama dengan hasil penelitian yang dikemukakan oleh Chen *et al.* (1996), Williams-Linera *et al.*, (1998), Asbjornsen *et al.* (2004). Para peneliti tersebut menyatakan bahwa iklim mikro berbeda pada tambalan (atau fragmen) yang kondisinya berbeda. Murcia (1995) mengemukakan bahwa iklim mikro berubah secara “*gradual*” dari tengah tambalan ke tepi dan ke dalam tambalan yang berdampingan, bergantung pada perubahan komposisi dan kerapatan vegetasi. Kombinasi dampak ini membutuhkan penelitian lebih lanjut dan lebih terperinci untuk mengevaluasi faktor utama yang mengendalikan perubahan suhu udara harian.

Perbedaan suhu udara antara tepi dengan posisi 32 m, rendah untuk transek yang memotong batas mangrove dengan pantai bervegetasi belukar maupun pepohonan (transek 3, 4 dan 5 lokasi 2 dan transek 2 lokasi 3). Selisih suhu udara yang rendah siang hari disebabkan oleh penerimaan energi radiasi, absorpsi dan emisi radiasi termal oleh permukaan bumi yang hampir sama antara pantai, tepi dan interior hutan mangrove. Kerapatan kanopi pada transek-transek tersebut juga rendah sehingga diduga terjadi difusi energi arah vertikal yang cukup besar, dan ini dibuktikan dengan selisih suhu udara tepi – interior yang rendah pada malam hari (0,5 °C).

Variabel suhu udara sebagai indikator difusi termal, menunjukkan bahwa peralihan difusi termal terjadi dua kali sehari. Perubahan arah difusi termal pertama pada sepuluh transek, terjadi dalam rentang jam 17.30 hingga 18.20, dan perubahan arah difusi termal kedua pada rentang jam 04.18 hingga jam 05.30. Arah difusi termal dalam selang

perubahan pertama hingga kedua, dari hutan mangrove ke lingkungan, karena energi termal lingkungan lebih tinggi dari energi termal dalam hutan mangrove. Arah difusi termal dalam selang perubahan kedua hingga perubahan pertama (siang hari), dari lingkungan ke dalam hutan mangrove. Peralihan arah difusi termal ditandai dengan nilai gradien tepi suhu udara nol. Hasil penelitian ini bersesuaian dengan hasil penelitian iklim mikro di hutan (Kimberly *et al.*, 1997; Alvala *et al.*, 2002; Drever and Lertzman, 2003; Heithecker and Halpern, 2007). Hasil penelitian mereka menyatakan bahwa dalam satu hari terjadi dua kali perubahan arah difusi termal, sekitar jam 05.00 dan jam 18.00.

Kedalaman efek tepi suhu udara antar transek, berbeda signifikan. Kedalaman efek tepi paling jauh pada siang hari terjadi pada transek 2 dan transek 3, lokasi 1 dan transek 1 lokasi 3. Hutan mangrove pada transek 2 lokasi 1 dan transek 1 lokasi 3 termasuk tipe *fringe*, homogen ditumbuhi *Rhizophora*, dengan kerapatan kanopi lebih 75 %. Hutan mangrove pada transek 3 lokasi 1 termasuk tipe *riverine* dengan kondisi vegetasi yang sama dengan transek 2 lokasi 1 dan transek 1 lokasi 3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tutupan kanopi menentukan kedalaman efek tepi.

Hutan mangrove pada transek 1 lokasi 1 termasuk ekotipe *fringe*, dengan kondisi kanopi sama dengan transek 2 lokasi 1. Perbedaan kedalaman efek tepi siang hari (transek 1 lokasi 1: 38,13 m dan transek 2 lokasi 1 44,6 m) mengindikasikan pengaruh celah di bagian belakang transek 1 lokasi 1. Peningkatan emisi termal oleh air laut pada siang hari, potensial menyebabkan difusi termal dari celah ke dalam hutan, sehingga terjadi difusi dua arah, dari tepi depan berbatasan dengan laut dan dari tepi berbatasan dengan celah di bagian belakang. Difusi termal dua arah menyebabkan peningkatan suhu udara di bawah kanopi, sehingga suhu udara menjadi homogen (karena kanopi rindang) mendekati suhu di tepi. Perbedaan nilai suhu udara yang kecil antara tepi - interior, menyebabkan kedalaman efek tepi berkurang. Pengaruh celah pada transek 1 lokasi 1, bersesuaian dengan hasil penelitian efek tepi iklim mikro hutan oleh Black *et al.* (1991), Örländer and Langvall (1993), Canham *et al.* (1999), Gray *et al.* (2002), dan Zulkiflee and Blackburn (2010).

Kedalaman efek tepi suhu udara pada transek 1 lokasi 2 hanya 28,39 m. Kedalaman efek tepi ini dapat diduga disebabkan oleh pengaruh tambalan di bagian belakang yang tutupan kanopinya kurang dibanding bagian depan yang tutupan kanopinya 90 – 95 %. Penetrasi radiasi matahari yang tinggi (Malanson and Carins 1995), menyebabkan suhu udara pada bagian dalam mendekati atau hampir sama dengan suhu udara tepi sehingga kedalaman efek tepi berkurang (Chen *et al.*, 1999). Kesimpulan ini bersesuaian dengan selisih suhu tepi - interior yang rendah pada transek 1 lokasi 2.

Kedalaman efek tepi suhu udara maksimum siang hari untuk ke sepuluh transek, terjadi pada waktu bervariasi antara jam 10.00 hingga jam 13.00. Variasi ini bergantung pada kondisi ekosistem dan lingkungan sekitar tepi. Perubahan kedalaman efek tepi malam hari, lebih kompleks dibanding siang hari. Malam hari terdapat beberapa data kedalaman terjauh, yang waktunya tidak memiliki pola yang jelas. Malam hari, kedalaman efek tepi ditunjukkan oleh pencapaian grafik perubahan spasial suhu udara yang menjadi konstan pada posisi tertentu, setelah naik secara eksponensial dari tepi (batas) mangrove.

Data kedalaman efek tepi pada kondisi tidak ada pengaruh angin, paling jauh 46,34 m (transek 3 lokasi 1). Kedalaman efek tepi ini bertambah apabila angin bertiup dari tepi ke dalam hutan (hasil simulasi). Kedalaman efek tepi suhu udara yang diperoleh dari penelitian ini hampir sama dengan hasil penelitian Kapos (1989), yang mencatat kedalaman efek tepi 40 m, dan berada dalam rentang hasil penelitian Moore *et al.* (2005) antara 15 hingga 60 m, tapi berbeda dengan hasil penelitian De Siquerian *et al.* (2004), yang mencatat kedalaman efek tepi suhu udara sekitar 90 – 120 meter.

Gradien iklim mikro (termasuk suhu udara) banyak digunakan sebagai indikator kuantitas dan arah difusi termal dari lingkungan ke dalam ekosistem hutan dan sebaliknya (Chen *et al.*, 1993b; Cadenasso *et al.*, 1997; Davies Colley *et al.*, 2000; Newmark, 2001; Heithecker and Halpern, 2007). Data gradien tepi suhu udara pada Tabel 5.8 menunjukkan gradien maksimum pada batas ekosistem mangrove dengan lingkungan. Data gradien yang disajikan pada Tabel 4.8, memiliki tanda positif untuk gradien malam hari, dan negatif untuk gradien pada siang hari. Tanda gradien menunjukkan arah difusi energi termal. Tanda negatif berarti arah difusi termal dari lingkungan ke dalam hutan mangrove (suhu udara di lingkungan lebih tinggi dari suhu udara dalam hutan mangrove). Tanda positif berarti arah difusi termal dari hutan mangrove ke lingkungan. Besarnya gradien atau kemiringan gradien menunjukkan perbedaan suhu udara luar dengan suhu udara dalam hutan mangrove.

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa transek 2 dan transek 3 lokasi 1, transek 2 lokasi 2, dan transek 1 lokasi 3 memiliki luas bidang dinamika gradien suhu udara siang hari yang lebih besar dibanding transek lainnya. Keempat transek ini juga menunjukkan luas bidang dinamika gradien suhu udara malam hari yang lebih besar dibanding transek lainnya. Hasil ini bersesuaian dengan selisih suhu udara siang hari antara tepi dengan posisi 32 m dalam hutan mangrove. Secara fisis, luas bidang dinamika gradien suhu udara siang hari ditentukan oleh dua faktor utama. Faktor pertama adalah kenaikan suhu udara yang tinggi di atas permukaan laut dekat tepi mangrove. Faktor kedua adalah kerapatan kanopi yang tinggi, dan dapat mereduksi penetrasi radiasi matahari ke bawah kanopi, sekaligus dapat menyimpan energi termal.

Luas bidang dinamika gradien suhu udara siang hari pada transek 1 lokasi 1, lebih rendah dari kedua transek lainnya dalam lokasi yang sama. Perbedaan ini disebabkan oleh difusi dua arah dari udara di atas permukaan laut bagian depan dan bagian belakang. Difusi termal dua arah menyebabkan suhu udara pada bagian tengah menjadi tinggi dan gradien suhu udara pada batas mangrove menjadi rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa parameter luas bidang dinamika gradien suhu udara dipengaruhi oleh celah atau ruang terbuka yang membentuk tepi berdekatan dengan batas mangrove dengan laut.

Fenomena dinamika gradien suhu udara pada transek 1 lokasi 2, mirip dengan transek 1 lokasi 1. Luas bidang dinamika gradien suhu udara siang hari dan malam hari di transek 1, dipengaruhi oleh tambalan pada bagian dalam hutan mangrove. Tambalan dengan kerapatan kanopi berbeda pada transek 1 lokasi 2, secara fisis mempengaruhi difusi termal baik pada arah vertikal maupun horizontal, sehingga mempengaruhi perubahan temporal dan variasi spasial iklim mikro. Chen *et al.* (1999) mengemukakan bahwa gradien iklim mikro di tepi dan sekitar tambalan, berasosiasi dengan komposisi dan pertumbuhan vegetasi. Gradien iklim mikro pada batas tambalan akan bergantung pada luas tambalan. Respons iklim mikro terhadap struktur kanopi dapat dibedakan berdasarkan tipe tambalan (Reifsnyder *et al.*, 1971; Chen and Franklin, 1997). Pengaruh tambalan terhadap perubahan temporal dan spasial suhu udara pada transek 1 lokasi 2, sejalan dengan kesimpulan penelitian Didham and Lawton (1999) dan Asbjornsen *et al.* (2004) yang menyatakan bahwa perbedaan struktur dalam tambalan hutan (*forest patches*), mempengaruhi pola iklim mikro memotong tepi hutan (gradien tepi dan luas bidang dinamika harian gradien suhu udara).

Luas bidang dinamika gradien suhu udara malam hari menunjukkan bahwa hutan mangrove dapat mengendalikan pelepasan energi termal ke lingkungan. Kanopi yang lebih rapat dapat mengendalikan difusi termal pada arah vertikal (pada saat suhu udara di atas kanopi lebih rendah). Penurunan suhu udara malam hari dalam hutan mangrove yang kanopinya lebat, lebih lambat dibanding lingkungan, sehingga terjadi difusi termal dari mangrove ke lingkungan. Hasil analisis komparatif dinamika harian gradien suhu

udara antara sepuluh transek menyimpulkan bahwa dinamika harian gradien suhu udara memiliki pola yang sama. Perbedaan luas bidang dinamika gradien, siang dan malam hari antar transek, menunjukkan bahwa parameter ini dapat digunakan sebagai indikator kondisi ekosistem dan interaksinya dengan lingkungan. Perbedaan-perbedaan kondisi ekosistem terungkap melalui parameter ini adalah (1) perbedaan lingkungan yang berbatasan dengan mangrove (laut, jalan aspal, pantai bervegetasi), (2) pengaruh celah terbuka dan lebar hutan mangrove (transek 1 lokasi 1), (3) adanya tambalan (transek 1 lokasi 2), dan (4) pengaruh kerapatanutupan kanopi. Tinggi tegakan yang berbeda antara transek 2 dan transek 3 lokasi 1 dengan transek 1 lokasi 3 ternyata tidak menunjukkan perbedaan signifikan pada luas bidang dinamika gradien suhu udara siang maupun malam hari. Indeks dinamika harian gradien suhu udara antara kesepuluh transek, ternyata tidak menunjukkan perbedaan signifikan. Indeks ini menunjukkan difusi energi termal malam dengan siang hari dan mencerminkan kondisi ekosistem dan responsnya terhadap perubahan yang terjadi di lingkungan. Nilai indeks dinamika harian ini dapat diinterpretasi secara fisis, bahwa hutan mangrove dapat menyimpan energi termal yang diterima pada siang hari, dan melepaskan energi tersebut secara perlahan ke lingkungan, di malam hari. Proses difusi dan fluks termal terutama ditentukan oleh kondisi lingkungan berbatasan danutupan kanopi mangrove.

Transek yang berbatasan dengan laut (fluktuasi penyinaran dan emisi termal tinggi) pada umumnya homogen ditumbuhi *Rhizophora*, dengan tingkatutupan kanopi tinggi (lebih besar 75 %). Karakteristik iklim mikronya adalah: (1) luas bidang dinamika harian gradien suhu udara yang besar pada siang hari, (2) luas bidang dinamika harian gradien suhu udara yang besar pada malam hari. Hutan mangrove denganutupan kanopi rendah menunjukkan luas bidang dinamika gradien yang kecil (siang dan malam hari), namun indeks dinamika harian yang hampir sama dengan hutan mangrove dengan kanopi lebat. Hasil analisis komparatif menunjukkan bahwa ketiga parameter (luas bidang dinamika gradien siang dan malam hari, serta indeks dinamika gradien suhu udara) potensial untuk dijadikan indikator dalam evaluasi dan pemantauan kondisi ekosistem mangrove, atau perubahan yang terjadi di lingkungan berbatasan. Ketiga parameter harus diinterpretasi sebagai satu kesatuan.

## 2) Variabel kelembaban udara

Luaran hasil analisis dan pemodelan untuk penentuan parameter kuantitatif kelembaban udara disajikan pada Tabel 4.9. Data pada Tabel 4.9 menunjukkan kelembaban udara pada malam hari lebih tinggi dari siang hari. Kelembaban maksimum malam hari pada sepuluh transek, bervariasi antara 84,2 (transek 1 lokasi 1) hingga 88,3 % (transek 2 lokasi 3). Kelembaban minimum (siang hari) untuk kesepuluh transek bervariasi antara 57,3 (transek 1 lokasi 2) hingga 63,3 % (transek 2 lokasi 3). Kelembaban minimum siang hari pada delapan transek (transek 2 dan 3 lokasi 1, transek 2, 3, 4, dan 5 lokasi 2, dan transek 1, dan 2 lokasi 3) terjadi pada waktu yang sama dengan tercapainya suhu udara maksimum. Kesesuaian waktu ini menunjukkan hubungan terbalik antara perubahan suhu udara dengan kelembaban udara, seperti pada ruang tertutup.

Dua transek yang menunjukkan perbedaan waktu tercapainya suhu udara minimum dengan kelembaban maksimum (siang hari) adalah transek 1 lokasi 1 dan transek 1 lokasi 2. Perbedaan waktu tercapainya suhu udara maksimum dengan kelembaban minimum pada kedua transek dapat diduga karena kondisi struktur kanopi dan kondisi ekologis lainnya. Celah terbuka lebar pada transek 1 lokasi 1 dan tambalan pada transek 1 lokasi 2 memperbesar energi radiasi cahaya yang masuk ke bawah kanopi, meningkatkan emisi termal dan difusi termal. Penetrasi radiasi matahari yang tinggi di bagian dalam hutan (transek 1 lokasi 2), dan difusi termal dari dua tepi ada transek 1



lokasi 1, berpotensi menyebabkan perubahan suhu udara yang tidak sama dengan perubahan kelembaban udara. Fenomena ini perlu diteliti lebih lanjut.

Transek yang menunjukkan kelembaban maksimum rendah pada siang dan malam hari adalah transek 1 lokasi 1 dan transek 1 lokasi 2. Kelembaban yang rendah dapat diduga disebabkan oleh ukuran hutan mangrove yang ramping karena adanya celah pada transek 1 lokasi 1 dan tambalan pada transek 1 lokasi 2. Hutan yang lebih ramping menunjukkan kelembaban udara yang lebih rendah daripada hutan yang lebar dan luas ([Didham and Lawton](#), 1999; [Gehlhausen et al.](#), 2000; [De Siqueiran et al.](#), 2004; [Pinto et al.](#), 2010).

Interpretasi komparatif menunjukkan bahwa transek yang berbatasan dengan pantai bervegetasi (transek 3, 4, dan 5 lokasi 2 dan transek 2 lokasi 3), menunjukkan kelembaban siang hari yang lebih tinggi dari transek lainnya. Kelembaban yang tinggi pada siang hari bersesuaian dengan suhu udara yang rendah karena pengaruh naungan vegetasi pantai. Pengaruh naungan menyebabkan penurunan emisi termal di lingkungan (pantai) yang berbatasan dengan hutan mangrove. Emisi termal yang rendah menyebabkan suhu udara yang rendah dan kelembaban udara yang lebih tinggi (siang hari) dibanding tepi yang berbatasan dengan laut. Waktu peralihan difusi termal atau waktu tercapainya kesetimbangan termal udara antara lingkungan dengan ekosistem mangrove, yang ditunjukkan oleh data suhu udara (baris 4 Tabel 4.8) dengan data kelembaban udara (baris 4 Tabel 4.8) memiliki kesesuaian yang tinggi. Sembilan dari sepuluh transek menunjukkan kesesuaian waktu terjadinya difusi termal pertama (jam 17.12 – 18.18) dan kedua (jam 04.16 – 06.06) dengan selisih kurang dari 7 menit. Kesesuaian ini menunjukkan bahwa kedua variabel berubah secara bersamaan (terbalik), karena kedua variabel dipengaruhi oleh perubahan difusi termal antara lingkungan dengan hutan mangrove.

Kedalaman efek tepi kelembaban udara siang hari pada sepuluh transek, bervariasi antara 30,43 hingga 54,49 m dari tepi. Malam hari, kedalaman efek tepi bervariasi antara 21,5 hingga 35,06 m. Pada siang dan malam hari, transek yang menunjukkan kedalaman efek tepi terjauh adalah transek 2 dan 3 lokasi 1, dan transek 1 lokasi 3. Transek yang sama menunjukkan kedalaman efek tepi suhu udara yang lebih jauh dari transek lainnya. Hasil ini menunjukkan bahwa transek yang berbatasan dengan laut terbuka, mengalami fluktuasi kelembaban udara lebih jauh ke tengah hutan. Faktor penyebab fenomena ini secara fisis adalah: (1) fluktuasi termal yang lebih besar pada lingkungan berbatasan, sehingga terjadi difusi termal lebih jauh ke dalam hutan dan menyebabkan perubahan suhu dan kelembaban udara lebih jauh ke dalam hutan, (2) gerakan massa air laut yang mengandung energi termal lebih tinggi, berpengaruh pada difusi termal antara massa air laut dengan udara di bagian dalam hutan mangrove, (3) massa air laut yang lebih panas, potensial menyebabkan penguapan air lebih besar sehingga udara dalam hutan menjadi lebih lembab.

Kedalaman efek tepi juga dipengaruhi oleh adanya celah (perbandingan transek 1 dengan transek 2, lokasi 1). Lingkungan berbatasan dan kondisi kanopi yang sama antara transek 1 dan transek 2 lokasi 1, tapi kedalaman efek tepi siang dan malam hari berbeda signifikan. Kedalaman efek tepi siang hari pada transek 1 adalah 42,94 m dan pada malam hari 27,66 m. Kedalaman efek tepi siang hari pada transek 2 adalah 50,04 m dan pada malam hari 31,09 m. Kedalaman efek tepi pada transek 1 diduga dipengaruhi oleh difusi termal dari dua tepi (tepi luar berhadapan dengan laut, dan tepi dalam berhadapan dengan celah atau ruang terbuka). Difusi termal dua arah pada transek 1 lokasi 1, menyebabkan perbedaan energi termal di dalam dan di luar menjadi lebih kecil, yang ditunjukkan oleh selisih kelembaban udara antara tepi dengan bagian dalam hutan mangrove. Difusi termal dua arah dari dua tepi yang berdekatan, juga terjadi pada transek 1 lokasi 2

Tabel 4.6. Rangkuman hasil pemodelan dan analisis penentuan parameter untuk variabel kelembaban udara

| Parameter  |            | Parameter kelembaban udara (%) menurut lokasi penelitian dan transek |       |       |                 |       |       |       |       |        |       |
|--|------------|--|-------|-------|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|  |            | Talengen   |       |       | Ratatotok Timur |       |       |       |       | Arakan |       |
|  |            | 1  | 2     | 3     | 1               | 2     | 3     | 4     | 5     | 1      | 2     |
| Kelembaban udara tertinggi (%) dan waktunya (jam, menit)           | kelembaban | 85,00  | 87,00 | 87,00 | 84,20           | 85,80 | 86,70 | 86,70 | 86,70 | 85,80  | 88,30 |
|  | Jam        | 01.00  | 01.00 | 01.00 | 01.00           | 01.00 | 03.00 | 03.00 | 03.00 | 02.00  | 04.00 |
| Kelembaban udara terendah (%) dan waktunya (jam, menit)            | kelembaban | 57,7   | 58,6  | 59,20 | 57,3            | 59,2  | 59,9  | 59,9  | 63,00 | 57,80  | 63,30 |
|  | Jam        | 12.00  | 13.00 | 13.00 | 14.00           | 12.00 | 13.00 | 13.00 | 13.00 | 13.00  | 13.00 |
| Selisih maks. kelembaban di tepi & dalam hutan mangrove (%)        | Siang hari | 3,400  | 5,900 | 6,100 | 3,00            | 6,100 | 2,100 | 2,700 | 2,700 | 6,100  | 4,70  |
|  | Malam hari | 2,00   | 2,700 | 2,700 | 2,00            | 2,700 | 1,400 | 1,700 | 1,700 | 2,400  | 1,60  |
| Waktu peralihan difusi termal (jam, menit) berdasarkan kelembaban  | Pertama    | 18.12  | 18.6  | 18.18 | 17.18           | 17.36 | 17.42 | 17.52 | 17.40 | 17.52  | 17.2  |
|  | Kedua      | 04.54  | 04.54 | 05.00 | 04.54           | 04.58 | 04.16 | 04.24 | 04.26 | 05.24  | 05.24 |
| Kedalaman efek tepi siang hari (m) & waktu terjadinya (jam, menit) | Jarak      | 42,94  | 50,04 | 54,49 | 31,12           | 35,75 | 24,42 | 37,08 | 31,74 | 47,09  | 30,43 |
|  | Waktu      | 10.00  | 13.00 | 11.00 | 12.00           | 11.00 | 11.00 | 10.00 | 11.00 | 13.00  | 11.00 |
| Kedalaman efek tepi malam hari (m) & waktu terjadinya (jam, menit) | Jarak      | 27,66  | 31,09 | 29,33 | 27,68           | 28,93 | 22,99 | 23,41 | 21,50 | 35,06  | 21,66 |
|  | Malam hari | 20.00  | 02.00 | 02.00 | 24.00           | 02.00 | 03.00 | 03.00 | 02.00 | 02.00  | 03,00 |
| Gradien tepi tertinggi (%/m) pada siang hari                       | Gradien    | 2,642  | 2,452 | 2,711 | 2,085           | 3,037 | 2,091 | 2,021 | 2,296 | 2,401  | 2,406 |
|  | Waktu      | 06.18  | 11.12 | 07.36 | 15.54           | 12.12 | 10.42 | 08.36 | 07.30 | 11.06  | 07.42 |
| Gradien tepi tertinggi (%/m) pada malam hari                       | Gradien    | 1,497  | 1,78  | 1,700 | 1,394           | 1,574 | 1,30  | 1,332 | 1,138 | 1,697  | 1,149 |
|  | Waktu      | 20.42  | 24.30 | 24.30 | 22.42           | 24.42 | 01.42 | 01.30 | 23.18 | 24.36  | 02.24 |
| Luas bidang dinamika gradien (%.jam/m)                             | Siang hari | 19,34  | 20,01 | 20,36 | 17,84           | 20,48 | 16,76 | 15,50 | 18,45 | 19,48  | 21,29 |
|  | Malam hari | 9,179  | 10,03 | 9,768 | 8,445           | 9,650 | 8,355 | 8,374 | 8,069 | 9,887  | 8,341 |
| Indeks dinamika gradient   |            | 0,475  | 0,501 | 0,480 | 0,473           | 0,471 | 0,499 | 0,540 | 0,437 | 0,508  | 0,392 |

Variasi kedalaman efek tepi kelembaban udara yang dihasilkan dari penelitian ini, berada dalam rentang hasil penelitian De Siquerian *et al.* (2004). De Siquerian *et al.* mencatat variasi kedalaman efek tepi kelembaban udara antara 20 – 120 m. Variasi kedalaman efek tepi kelembaban udara bergantung pada kondisi ekosistem dan lingkungan berbatasan, seperti diperoleh dari penelitian ini dan hasil penelitian terdahulu oleh Chen *et al.* (1995), Davies-Colley *et al.* (2000), dan Laurance *et al.* (2007). Hasil ini menunjukkan bahwa kedalaman efek tepi merupakan karakteristik kondisi ekosistem hutan mangrove dan lingkungan berbatasan.

Gradien tepi kelembaban udara yang tinggi pada siang hari ditunjukkan oleh transek yang memotong tepi berbatasan dengan laut terbuka. Gradien kelembaban udara malam hari, hampir sama pada sepuluh transek. Variasi gradien pada siang hari disebabkan oleh penyinaran matahari. Laut terbuka menerima energi radiasi matahari lebih besar, menyebabkan penguapan dan meningkatkan kelembaban udara lebih tinggi di luar tepi mangrove. Penetrasi radiasi dan kelembaban yang rendah di pantai yang ditumbuhi belukar dan pohon, menyebabkan gradien tepi kelembaban udara yang landai.

Parameter luas bidang dinamika harian kelembaban udara menunjukkan variasi nilai dan kesesuaian pengelompokan transek yang sama dengan gradien tepi. Transek yang berbatasan dengan laut menunjukkan luas bidang dinamika gradien kelembaban udara (siang dan malam hari) lebih besar dibanding transek berbatasan dengan pantai. Hasil penelitian membuktikan bahwa perbedaan kelembaban udara antara tepi berbatasan dengan laut dan dengan pantai, tidak hanya berlangsung sesaat (ditunjukkan oleh nilai maksimum gradien tepi), tapi berlangsung sepanjang hari (ditunjukkan oleh luas bidang dinamika harian gradien kelembaban udara). Hasil penelitian membuktikan bahwa parameter gradien tepi dan luas bidang dinamika harian gradien iklim mikro dapat mengkarakterisasi interaksi antara hutan mangrove dengan lingkungan berbatasan. Kedua parameter saling melengkapi dan mencirikan kuantitas dan perubahan arah difusi termal antara lingkungan dengan hutan mangrove. Indeks dinamika harian gradien kelembaban udara pada sepuluh transek pengukuran, menunjukkan kondisi ekosistem dan interaksi lingkungan yang sebanding pada waktu siang dan malam hari.

### 3) Variabel kuat penerangan

Data hasil pengukuran menunjukkan kuat penerangan maksimum pada permukaan terbuka (data baris 1, Tabel 4.10) untuk sepuluh transek bervariasi antara 50.250 – 59.900 lux. Kuat penerangan maksimum dicapai pada waktu bervariasi dalam rentang jam 12.00 – 13.00. Selisih maksimum kuat penerangan di tepi dengan bagian dalam hutan mangrove, bervariasi bergantung pada lingkungan berbatasan dengan mangrove. Transek memotong batas mangrove dengan laut (transek 1, 2, dan 3 lokasi 1, transek 2 lokasi 2, dan transek 1 lokasi 3), menunjukkan selisih kuat penerangan antara tepi dengan bagian dalam hutan mangrove lebih tinggi dibanding transek memotong batas mangrove dengan pantai bervegetasi (transek 3, 4, dan 5 lokasi 2, dan transek 2, lokasi 3). Perbedaan ini dipengaruhi naungan pohon di pantai, yang mereduksi perbedaan kuat penerangan di bagian tepi dengan bagian dalam hutan mangrove. Perbedaan kuat penerangan yang besar antara tepi dengan bagian dalam hutan pada transek 1, 2, 3 lokasi 1, transek 2 lokasi 2 dan transek 1 lokasi 3, dipengaruhi tutupan kanopi hutan mangrove yang rapat. Hutan mangrove yang bertumbuh di lima transek ini, homogen (jenis *Rhizophora*) dengan kerapatan kanopi di atas 72 %. Kanopi mangrove yang lebat mereduksi kuat penerangan di bawah kanopi. Hasil ini sejalan dengan hasil penelitian Reifsnyder and Lull (1965), Örlander and Langvall (1993), Chen *et al.*, (1993b) dan Kimberley *et al.* (1997), yang menyimpulkan bahwa intensitas radiasi matahari yang mencapai permukaan tanah (*floor*) bergantung pada spesies pohon dan tutupan kanopi

Waktu tercapainya perbedaan kuat penerangan maksimum antara bagian luar dan tepi dengan bagian dalam hutan mangrove bervariasi antara jam 12.00 – 13.00. Tidak ada pola atau hubungan yang jelas antara waktu tercapainya selisih kuat penerangan maksimum dengan kondisi ekosistem transek. Faktor-faktor yang diduga menyebabkan perbedaan tersebut adalah naungan (berkaitan dengan tinggi tegakan, bentuk dan kerapatan kanopi), orientasi tepi terhadap lintasan matahari, halangan penyinaran matahari oleh pegunungan dll. Pengaruh faktor-faktor tersebut terhadap kuat penerangan matahari, antara lain telah diteliti oleh Spittlehouse (2004), Black *et al.* (1991) dan Canham *et al.* (1999). Pengaruh faktor-faktor tersebut terhadap selisih kuat penerangan tepi-interior dalam hutan mangrove perlu diteliti lebih lanjut.

Kedalaman efek tepi kuat penerangan tidak berbeda signifikan antar transek. Kedalaman efek tepi bervariasi antara 24,6 (transek 2, lokasi 3) hingga 26 m (transek 1, lokasi 3). Kedalaman efek tepi kuat penerangan yang diperoleh dari penelitian ini, kurang dibanding kedalaman efek tepi suhu udara dan kelembaban udara. Hasil penelitian kedalaman efek tepi ini berada dalam rentang hasil penelitian kedalaman efek tepi radiasi matahari di hutan atau perkebunan yang dilakukan oleh Young and Mitchell (1994), Dignan and Bren (2003), De Siqueiran *et al.* (2004), Pohlman *et al.* (2007), Broadbent *et al.* (2008). Mereka mencatat rentang kedalaman efek tepi antara 15 – 30 m. Waktu tercapainya kedalaman efek tepi untuk masing-masing transek sama, yakni pada jam 12.00. Hal ini berkaitan dengan puncak kuat penerangan matahari pada jam 12.00.

Gradien kuat penerangan di batas mangrove bervariasi antara 1879 (transek 2, lokasi 2) hingga 2394 lux/m (transek 1, lokasi 1). Waktu terjadinya gradien paling terjal bervariasi cukup signifikan antar transek. Transek yang memotong batas mangrove dengan pantai bervegetasi (transek 3, 4, 5 lokasi 2 dan transek 2 lokasi 3), menunjukkan waktu tercapainya gradien tertinggi, lebih lambat dibanding transek berbatasan dengan laut (transek 1, 2, 3 lokasi 1 dan transek 1 lokasi 3). Luas bidang dinamika harian kuat penerangan matahari (hanya siang hari), pada transek memotong batas mangrove dengan pantai bervegetasi, lebih kecil dibanding transek memotong batas mangrove dengan laut. Perbedaan ini berkaitan dengan pengaruh naungan pohon di pantai berbatasan dengan mangrove, menyebabkan perbedaan kuat penerangan antara hutan mangrove dengan lingkungan, rendah.

Tabel 4.7. Rangkuman hasil pemodelan dan analisis penentuan parameter untuk variabel kuat penerangan

| Parameter   |              | Parameter kuat penerangan, menurut lokasi penelitian dan transek |       |       |                 |       |       |       |       |        |       |
|---|--------------|--|-------|-------|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|   |              | Talengen   |       |       | Ratatotok Timur |       |       |       |       | Arakan |       |
|   |              | 1  | 2     | 3     | 1               | 2     | 3     | 4     | 5     | 1      | 2     |
| Kuat penerangan maksimum (lux) dan waktunya (jam, menit)      | Penerangan   | 599  | 597   | 597   | 590             | 595   | 512,1 | 518,1 | 512,2 | 597    | 5025  |
|   | Jam          | 12.00  | 12.00 | 12.00 | 12.00           | 12.00 | 12.00 | 13.00 | 12.00 | 13.00  | 12.00 |
| Kuat penerangan minimum (lux) dan waktunya (jam, menit)       | Penerangan   | 0,212  | 0,210 | 0,211 | 0,223           | 0,311 | 0,308 | 0,203 | 0,318 | 0,211  | 0,309 |
|   | Jam          | 06.00  | 18.00 | 06.00 | 06.00           | 06.00 | 18.00 | 18.00 | 18.00 | 18.00  | 18.00 |
| Selisih maks. penerangan di tepi & dalam hutan mangrove (lux) | Selisih pen. | 36,3   | 33,5  | 33,1  | 34,8            | 34,3  | 25,4  | 24,6  | 25,40 | 34,5   | 24,4  |
|   | jam          | 12.00  | 12.00 | 13.00 | 12.00           | 12.00 | 12.00 | 13.00 | 12.00 | 13.00  | 12.00 |
| Kedalaman efek tepi (m) & waktu terjadinya (jam, menit)       | Jarak        | 25,06  | 25,83 | 25,24 | 25,72           | 25,58 | 25,39 | 24,85 | 25,39 | 26,03  | 24,55 |
|   | Waktu        | 12.00  | 12.00 | 12.00 | 12.00           | 12.00 | 12.00 | 12.00 | 12.00 | 12.00  | 12.00 |
| Gradien tepi tertinggi (lux/m) dan Waktu terjadinya           | Gradien *    | 23,94  | 20,03 | 20,05 | 20,69           | 18,79 | 19,83 | 20,07 | 20,10 | 21,70  | 20,64 |
|   | Waktu        | 13.12  | 12.18 | 11.54 | 10.18           | 13.18 | 14.06 | 15.48 | 14.06 | 11.36  | 14.00 |
| Luas bidang dinamika gradien (lux.jam/m)                      |              | 169,9  | 163,6 | 169,5 | 161,7           | 151,4 | 152,4 | 143,5 | 150,3 | 166,8  | 152,5 |

Catatan: \* tanda gradien negatif

- data yang dianalisis adalah hasil pengukuran dan pemodelan untuk rentang waktu jam 06.00 s/d 18.00
- Data kuat penerangan dan data terkait pada baris 1, 2, 3, dan 4 dikali 100, dalam satuan lux

#### 4) Variabel suhu air/tanah

Hasil analisis dan pemodelan serta penentuan parameter suhu air/tanah dalam hutan mangrove disajikan pada Tabel 4.11. Dinamika harian suhu air/tanah sekitar tepi hutan mangrove lebih kompleks dibanding dinamika suhu udara dan kelembaban udara. Suhu air/tanah di bawah kanopi mangrove dan lingkungan sekitarnya, selain dipengaruhi penyinaran matahari, juga dikendalikan oleh aktivitas pasut, dan aliran air segar dari pantai (Clough and Sim, 1989; Mazda *et al.*, 1990; Ellison, 2005; Krauss *et al.*, 2008). Massa air laut yang berbeda suhu dengan air di bawah kanopi mangrove, pola aliran air yang kompleks dll., menyebabkan perubahan tanda gradien suhu air/tanah menjadi kompleks.

Hutan mangrove berbatasan dengan pantai yang ditumbuhi pohon (transek 5 lokasi 2 dan transek 2 lokasi 3), menunjukkan suhu air/tanah maksimum (siang hari) lebih rendah dibanding transek lainnya. Suhu minimum kedua transek ini (malam hari) lebih rendah dibanding transek lainnya. Selisih suhu tertinggi dengan terendah siang maupun malam hari, lebih rendah pada kedua transek ini. Kanopi pohon di pantai, mereduksi penetrasi radiasi matahari, sehingga emisi termal di bawah kanopi relatif rendah dibanding di hutan mangrove yang berbatasan dengan permukaan terbuka.

Transek 1 lokasi 1 menunjukkan selisih suhu air maksimum antara tepi dengan posisi 32 m dari tepi, lebih rendah daripada transek lainnya, siang maupun malam hari. Transek 1 lokasi 1, merupakan ekotipe *fringe* yang pada bagian belakang (jarak 68 m) terdapat celah terbuka lebar (sekitar 30 m). Siang hari, perbedaan suhu air yang rendah antara bagian tepi dengan bagian dalam hutan mangrove, diduga disebabkan oleh pencampuran massa air dari laut di bagian depan dengan massa air dari celah terbuka yang suhunya tinggi. Malam hari, aliran air dari depan dan belakang menyebabkan perbedaan suhu air antara bagian tepi dengan bagian dalam hutan mangrove menjadi rendah. Gradien tepi suhu air/tanah bervariasi lebih kompleks dibanding gradien tepi suhu dan kelembaban udara. Perubahan tanda gradien tepi suhu air/tanah pada sembilan transek terjadi lebih dari dua kali sehari. Transek 5 lokasi 2, tidak menunjukkan perubahan tanda gradien. Gradien memiliki tanda positif sepanjang hari yang berarti suhu air/tanah di bawah kanopi mangrove secara terus menerus lebih tinggi dibanding suhu tanah di bawah kanopi vegetasi pantai yang berbatasan dengan mangrove.

Kedalaman efek tepi suhu air/tanah, kurang dibanding suhu udara dan kelembaban udara. Kedalaman efek tepi suhu air/tanah paling jauh pada sepuluh transek terjadi sekitar jam 10.00 hingga 14.00. Efek tepi pada waktu malam, terjadi dalam waktu yang sangat bervariasi antar transek. Efek tepi suhu air/tanah paling jauh diantara sepuluh transek, ditemukan pada transek 1 lokasi 2 yakni 27,24 m, terjadi pada jam 13.00. Kedalaman efek tepi suhu air/tanah kurang jauh dibanding kedalaman efek tepi suhu udara dan kelembaban udara. Hasil penelitian efek tepi suhu air/tanah dalam hutan mangrove ini memiliki kesamaan dengan penelitian efek tepi suhu tanah dalam hutan. Carmago and Kapos (1995), Gehlhausen (2000), De Siqueiran (2004), dan Broadbent *et al.*, (2008), menyatakan bahwa kedalaman efek tepi suhu tanah kurang dibanding dengan kedalaman efek tepi suhu udara dan kelembaban udara. Kedalaman efek tepi suhu air/tanah dalam hutan mangrove lebih kompleks dibandingkan kedalaman efek tepi suhu dan kelembaban udara pada transek yang sama. Hasil penelitian Carmago and Kapos (1995) juga menunjukkan bahwa perubahan kedalaman efek tepi suhu tanah lebih kompleks dibanding suhu dan kelembaban udara di bawah kanopi hutan di daratan. Kompleksitas variasi kedalaman efek tepi suhu air/tanah (dan parameter lainnya) disebabkan oleh faktor yang mengendalikan kedalaman efek tepi suhu air/tanah, dalam hal ini penyinaran matahari dan aliran massa air dengan suhu yang berbeda.

Analisis dinamika gradien suhu air/tanah menunjukkan pola yang lebih berfluktuasi dibandingkan dengan dinamika gradien suhu udara dan kelembaban udara, pada transek yang sama. Gradien suhu air/tanah dapat berubah tanda hingga enam kali sehari. Perubahan tanda gradien yang tidak bersesuaian dengan perubahan waktu siang dan malam, menjadi alasan untuk merumuskan luas bidang dinamika gradien suhu air/tanah menurut tanda gradien (negatif dan positif). Perubahan tanda gradien yang mengindikasikan waktu tercapainya kesetimbangan termal air/tanah antara hutan mangrove dengan lingkungan, sangat bervariasi antar transek. Kesetimbangan termal air/tanah turut dipengaruhi oleh aktivitas pasang surut yang mengalirkan massa air dengan suhu berbeda-beda, menyebabkan variasi suhu sepanjang transek.

Perbandingan luas bidang dinamika gradien suhu air/tanah antar transek, menunjukkan bahwa transek yang memiliki luas bidang di bawah garis keseimbangan (gradien bertanda negatif) yang lebih besar adalah transek yang berbatasan dengan laut (transek 1, 2, dan 3 lokasi 1, transek 1 lokasi 2, dan transek 1 lokasi 3). Kenaikan suhu air di laut terbuka lebih tinggi dibanding transek lain. Hutan mangrove pada kelima transek homogeny ditumbuhi satu jenis mangrove (*Rhizophora*) dengan tutupan kanopi lebih dari 72%. Kanopi yang rapat ini lebih besar mereduksi penetrasi radiasi matahari, sehingga mengurangi kenaikan suhu air di bawah kanopi dan menyebabkan gradien suhu di batas mangrove menjadi terjal.

Analisis luas bidang dinamika harian gradien suhu udara memperlihatkan fenomena penting dan menarik. Analisis antar transek tentang luas bidang dinamika gradien suhu air/tanah siang hari, menyimpulkan pengelompokan ekosistem mangrove yang sama dengan pengelompokan berdasarkan luas bidang dinamika gradien suhu udara dan kelembaban udara, walaupun pengelompokan berdasarkan parameter kedalaman efek tepi dan gradien tepi tidak bersesuaian. Hasil ini membuktikan keunggulan parameter luas bidang dinamika harian gradien iklim mikro untuk mengkarakterisasi kondisi ekosistem dan interaksi dengan lingkungan. Parameter ini dapat digunakan lebih luas dibanding parameter lain karena menggambarkan perubahan iklim mikro selama satu hari. Kesimpulan lain dari hasil analisis komparatif antar transek adalah: perubahan suhu air/tanah dikendalikan oleh penyinaran matahari, sehingga menunjukkan pola perubahan periodik harian seperti suhu udara, namun terdapat fluktuasi karena aktivitas pasut yang mengalirkan massa air dengan kandungan energi termal berbeda. Luas bidang dinamika gradien suhu air/tanah malam hari untuk sepuluh transek, tidak bersesuaian dengan luas bidang dinamika gradien suhu air/tanah siang hari. Pada malam hari, pengaruh penyinaran matahari hilang, sehingga variasi spasial dan perubahan temporal suhu air/tanah dikendalikan oleh aktivitas pasut yang mengalirkan massa air dengan kandungan energi termal bervariasi.

Tabel 4.8. Rangkuman hasil pemodelan dan analisis penentuan parameter untuk variabel suhu air/tanah

| Parameter   |         | Parameter suhu air/tanah ( $^{\circ}\text{C}$ ), menurut lokasi penelitian dan transek |       |        |                 |       |       |         |         |         |         |
|---|---------|--|-------|--------|-----------------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|
|   |         | Talengen   |       |        | Ratatotok Timur |       |       |         |         | Arakan  |         |
|   |         | 1  | 2     | 3      | 1               | 2     | 3     | 4       | 5       | 1       | 2       |
| Suhu air maksimum ( $^{\circ}\text{C}$ ) dan waktu tercapai (jam, menit)                | Suhu    | 29,5   | 29,3  | 28,9   | 28,9            | 29,1  | 29,00 | 28,9    | 28,5    | 29,1    | 28,5    |
|   | Jam     | 14.00  | 13.00 | 13.00  | 12.00           | 12.00 | 12.00 | 12.00   | 13.00   | 13.00   | 13.00   |
| Suhu air minimum ( $^{\circ}\text{C}$ ) dan waktu tercapai (jam, menit)                 | suhu    | 26,5   | 27,3  | 26,1   | 27,4            | 27,4  | 27,2  | 27,2    | 26,2    | 27,00   | 25,2    |
|   | Jam     | 02.00  | 01.00 | 03.00  | 01.00           | 10.00 | 04.00 | 03.00   | 02.00   | 05.00   | 03.00   |
| Selisih maksimum suhu air di tepi & dalam hutan mangrove ( $^{\circ}\text{C}$ )         | Siang   | 0,200  | 0,60  | 0,60   | 0,50            | 0,50  | 0,500 | 0,500   | 0,300   | 0,600   | 0,40    |
|   | Malam   | 0,200  | 0,40  | 0,20   | 0,20            | 0,40  | 0,300 | 0,300   | 0,300   | 0,200   | 0,20    |
| Waktu peralihan energi termal air (berdasarkan suhu air/tanah)                          | Pertama | *  | *     | *      | *               | *     | *     | *       | *       | *       | *       |
|   | Kedua   | *  | *     | *      | *               | *     | *     | *       | *       | *       | *       |
| Kedalaman efek tepi siang hari (m) & waktu terjadinya (jam, menit)                      | Jarak   | 13,76  | 12,9  | 24,56  | 27,24           | 26,36 | 8,54  | 23,36   | 10,73   | 19,23   | 12,40   |
|   | Waktu   | 13.00  | 13.00 | 14.00  | 13.00           | 13.00 | 13.00 | 13.00   | 10.00   | 13.00   | 12.00   |
| Kedalaman efek tepi malam hari (m) & waktu terjadinya (jam, menit)                      | Jarak   | 13,16  | 10,9  | 10,32  | 10,69           | 12,29 | 10,74 | 13,86   | 10,97   | 12,52   | 10,19   |
|   | Waktu   | 18.00  | 23.00 | 23.00  | 01.00           | 05.00 | 01.00 | 04.00   | 20.00   | 22.00   | 24.00   |
| Gradien tepi tertinggi siang hari ( $^{\circ}\text{C}$ ), & waktu terjadinya (jam, mnt) | Gradien | -0,33  | -0,63 | -0,35  | -0,23           | -0,27 | -0,32 | 0,390   | 0,469   | -0,478  | 0,462   |
|   | Waktu   | 15.6**   | 12.54 | 11.6** | 10.0**          | 06**  | 10**  | 13.36** | 10.12** | 11.54** | 10.6**  |
| Gradien tepi tertinggi malam hari ( $^{\circ}\text{C}$ ), & waktu terjadinya (jam, mnt) | Gradien | -0.38  | ***   | ***    | -0,29           | 0.296 | 0,341 | 0,331   | 1,138   | -0.26   | 0.106   |
|   | Waktu   | 02.2**   | **    | **     | 19.4**          | 23**  | 3.5** | 23.4**  | 03.42** | 23.42** | 23.54** |
| Luas bidang dinamika gradien ( $^{\circ}\text{C.jam/m}$ )                               | Negatip | 3,337  | 4,903 | 3,190  | 2,106           | 3,268 | 1,597 | 1,796   | 0,000   | 3,774   | 0,514   |
|   | Positip | 0,247  | 0,024 | 0,034  | 0,948           | 0,573 | 1,840 | 1,704   | 4,467   | 0,032   | 3,024   |
| Indeks dinamika gradien   |         | 0,074  | 0,005 | 0,011  | 0,450           | 0,175 | 1,152 | 0,949   | Inf     | 0,008   | 5,886   |

\*) terjadi lebih dua kali perubahan tanda gradien yang menandakan arah difusi termal

\*\*\*) hanya terjadi perubahan sesaat kemudian kembali pada arah gradien sebelumnya

\*\*) ada beberapa nilai gradien yang hampir sama dengan gradien maksimum



5) *Time lag* antara kuat penerangan dengan variabel iklim mikro lainnya

Hasil analisis/penentuan *time lag* antara perubahan kuat penerangan dengan perubahan suhu udara, kelembaban udara, dan suhu tanah, berturut-turut disajikan pada Tabel 4.12, Tabel 4.13 dan Tabel 4.14. Besarnya *time-lag* antara perubahan kuat penerangan dengan perubahan suhu udara untuk kesepuluh transek adalah 1 jam atau lebih. *Time lag* ini menunjukkan bahwa perubahan suhu udara tertinggal 1 jam atau lebih terhadap perubahan kuat penerangan. Transek 1, 2, dan 3, lokasi 1 dan transek 1, 2, 3, 5, lokasi 2 serta transek 1 lokasi 3, menunjukkan kecenderungan *time lag* bertambah dengan bertambahnya jarak dari tepi. Transek 4 lokasi 2 dan transek 2 lokasi 3 menunjukkan *time lag* antara perubahan kuat penerangan dengan perubahan suhu udara, yang sama untuk sembilan posisi pengukuran. Transek yang menunjukkan pola perubahan nilai *time lag* dari tepi ke dalam hutan, dengan sangat jelas adalah transek 2 dan 3 lokasi 1 dan transek 1 lokasi 3. Pola perubahan nilai *time lag* pada ketiga transek menunjukkan proses difusi termal dari tepi ke dalam hutan yang menyebabkan posisi dekat tepi suhunya berubah lebih awal daripada posisi yang lebih jauh dari tepi. Tutupan kanopi yang rindang dan homogen, serta lingkungan (laut) yang terbuka dan menerima banyak pasokan energi matahari menyebabkan fluks termal yang tinggi pada siang hari.

Nilai *time lag* yang merata menunjukkan bahwa perubahan suhu udara sepanjang transek belangsung sama. Nilai *time lag* seperti ini terjadi pada hutan mangrove yang tutupan kanopinya rendah, berbatasan dengan pantai bervegetasi. Kondisi ini menyebabkan perbedaan energi termal lingkungan dengan interior hutan rendah, sehingga fluks termal pada siang hari dari lingkungan ke dalam hutan mangrove rendah. Perbedaan energi termal lingkungan dengan hutan mangrove yang rendah, juga disebabkan oleh penetrasi radiasi matahari yang cukup tinggi menembus celah kanopi dan meningkatkan energi termal di bawah kanopi hutan mangrove. Perbedaan pola perubahan nilai *time lag* pada sepuluh transek memberikan kesimpulan bahwa *time lag* perubahan kuat penerangan dengan perubahan suhu udara, dapat menunjukkan proses difusi termal antara lingkungan dengan hutan mangrove, sekaligus dapat mengkarakterisasi iklim mikro hutan mangrove.

*Time lag* kuat penerangan dengan kelembaban udara, menunjukkan pola variasi yang sama dengan *time lag* antara kuat penerangan dengan suhu udara. Transek 4 lokasi 2, dan transek 2 lokasi 3 menunjukkan besaran *time lag* relatif tetap sepanjang transek, sedangkan transek lainnya menunjukkan peningkatan *time lag* dengan bertambahnya jarak dari tepi. Rentang besaran *time lag* kuat penerangan dengan kelembaban udara, sama dengan *time lag* kuat penerangan dengan suhu udara, yakni antara 1 – 1,5 jam. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa perubahan suhu udara dan kelembaban udara pada setiap posisi bergantung pada energi termal udara pada posisi tersebut, yang berubah secara temporal karena proses difusi. *Time lag* antara perubahan kuat penerangan dengan perubahan suhu air/tanah lebih lama dan lebih bervariasi dibanding *time lag* antara perubahan kuat penerangan dengan perubahan suhu udara. Hasil ini bersesuaian dengan hasil penelitian *time lag* yang dilaporkan oleh Davies Colley *et al.* (2000), bahwa suhu tanah berubah lebih lambat daripada suhu udara, karena konduksi panas dari permukaan ke lapisan tanah di bawah permukaan.

Pola perubahan *time lag* antara perubahan kuat penerangan dengan perubahan suhu air/tanah sepanjang transek tidak jelas dan kompleks. Pada beberapa transek, hingga jarak tertentu *time lag* bertambah, tapi kemudian berkurang dengan bertambahnya jarak dari tepi. Pola perubahan ini membuktikan bahwa perubahan suhu air/tanah tidak semata mengikuti perubahan penyinaran (kuat penerangan), tapi dipengaruhi oleh pencampuran massa air dengan suhu yang berbeda.

Tabel 4.9. Koefisien korelasi silang dan *time lag* antara perubahan kuat penerangan dengan perubahan suhu udara

| Posisi pengukuran | Koefisien korelasi dan <i>time-lag</i> menurut lokasi dan transek |         |           |         |           |         |                      |         |           |         |           |         |           |         |           |         |             |         |           |     |
|-------------------|---|---------|-----------|---------|-----------|---------|----------------------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-------------|---------|-----------|-----|
|                   | Desa Talengen   |         |           |         |           |         | Desa Ratatotok Timur |         |           |         |           |         |           |         |           |         | Desa Arakan |         |           |     |
|                   | Trans-1   |         | Trans-2   |         | Trans-3   |         | Trans-1              |         | Trans-2   |         | Trans-3   |         | Trans-4   |         | Trans-5   |         | Trans-1     |         | Trans-2   |     |
|                   | koef  | t-1     | koef      | t-1     | koef      | t-1     | koef                 | t-1     | koef      | t-1     | koef      | t-1     | koef      | t-1     | koef      | t-1     | koef        | t-1     | koef      | t-1 |
| 1                 | 0.99<br>4   | 1.<br>1 | 0.99<br>7 | 1.<br>1 | 0.99<br>3 | 1.<br>1 | 0.93<br>2            | 1.<br>0 | 0.96<br>1 | 1.<br>0 | 0.96<br>7 | 1.<br>0 | 0.92<br>0 | 1.<br>0 | 0.98<br>7 | 1.<br>0 | 0.99<br>6   | 1.<br>1 | 0.98<br>1 | 1.1 |
| 2                 | 0.99<br>5   | 1.<br>1 | 0.99<br>7 | 1.<br>1 | 0.99<br>4 | 1.<br>1 | 0.93<br>2            | 1.<br>0 | 0.95<br>9 | 1.<br>0 | 0.96<br>8 | 1.<br>0 | 0.91<br>9 | 1.<br>0 | 0.98<br>5 | 1.<br>0 | 0.99<br>6   | 1.<br>1 | 0.98<br>0 | 1.1 |
| 3                 | 0.99<br>5   | 1.<br>1 | 0.99<br>5 | 1.<br>1 | 0.99<br>2 | 1.<br>1 | 0.93<br>2            | 1.<br>0 | 0.96<br>1 | 1.<br>0 | 0.96<br>6 | 1.<br>0 | 0.92<br>5 | 1.<br>0 | 0.98<br>4 | 1.<br>0 | 0.99<br>4   | 1.<br>1 | 0.98<br>0 | 1.1 |
| 4                 | 0.98<br>1   | 1.<br>2 | 0.99<br>3 | 1.<br>2 | 0.98<br>1 | 1.<br>2 | 0.95<br>4            | 1.<br>1 | 0.92<br>7 | 1.<br>0 | 0.97<br>4 | 1.<br>1 | 0.94<br>4 | 1.<br>0 | 0.99<br>2 | 1.<br>1 | 0.98<br>8   | 1.<br>1 | 0.98<br>7 | 1.1 |
| 5                 | 0.96<br>7   | 1.<br>2 | 0.98<br>1 | 1.<br>3 | 0.95<br>7 | 1.<br>3 | 0.94<br>8            | 1.<br>1 | 0.91<br>6 | 1.<br>0 | 0.98<br>1 | 1.<br>1 | 0.94<br>4 | 1.<br>0 | 0.99<br>3 | 1.<br>1 | 0.97<br>8   | 1.<br>2 | 0.98<br>9 | 1.1 |
| 6                 | 0.96<br>2   | 1.<br>2 | 0.96<br>7 | 1.<br>4 | 0.95<br>4 | 1.<br>4 | 0.92<br>1            | 1.<br>1 | 0.90<br>2 | 1.<br>0 | 0.98<br>2 | 1.<br>1 | 0.94<br>4 | 1.<br>0 | 0.99<br>2 | 1.<br>1 | 0.97<br>1   | 1.<br>2 | 0.98<br>8 | 1.1 |
| 7                 | 0.96<br>7   | 1.<br>2 | 0.97<br>1 | 1.<br>4 | 0.97<br>2 | 1.<br>5 | 0.87<br>9            | 1.<br>2 | 0.89<br>8 | 1.<br>1 | 0.98<br>1 | 1.<br>1 | 0.93<br>9 | 1.<br>0 | 0.99<br>2 | 1.<br>1 | 0.97<br>7   | 1.<br>3 | 0.99<br>2 | 1.1 |
| 8                 | 0.96<br>3   | 1.<br>2 | 0.95<br>8 | 1.<br>5 | 0.96<br>8 | 1.<br>5 | 0.87<br>9            | 1.<br>1 | 0.98<br>9 | 1.<br>3 | 0.97<br>8 | 1.<br>1 | 0.89<br>2 | 1.<br>0 | 0.98<br>8 | 1.<br>1 | 0.96<br>9   | 1.<br>3 | 0.99<br>0 | 1.1 |
| 9                 | 0.96<br>7   | 1.<br>2 | 0.94<br>6 | 1.<br>5 | 0.96<br>1 | 1.<br>5 | 0.91<br>7            | 1.<br>2 | 0.87<br>6 | 1.<br>3 | 0.97<br>8 | 1.<br>2 | 0.87<br>3 | 1.<br>0 | 0.98<br>5 | 1.<br>1 | 0.95<br>7   | 1.<br>4 | 0.99<br>3 | 1.1 |

Tabel 4.10 Koefisien korelasi silang dan *time lag* antara perubahan kuat penerangan dengan perubahan kelembaban udara

| Posisi pengukuran | Koefisien korelasi dan <i>time-lag</i> menurut lokasi dan transek |      |         |      |         |      |                      |      |         |      |         |      |         |      |         |      |             |      |         |      |
|-------------------|---|------|---------|------|---------|------|----------------------|------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|-------------|------|---------|------|
|                   | Desa Talengen   |      |         |      |         |      | Desa Ratatotok Timur |      |         |      |         |      |         |      |         |      | Desa Arakan |      |         |      |
|                   | Trans-1   |      | Trans-2 |      | Trans-3 |      | Trans-1              |      | Trans-2 |      | Trans-3 |      | Trans-4 |      | Trans-5 |      | Trans-1     |      | Trans-2 |      |
|                   | koef  | t-l  | koef    | t-l  | koef    | t-l  | koef                 | t-l  | koef    | t-l  | koef    | t-l  | koef    | t-l  | koef    | t-l  | koef        | t-l  | koef    | t-l  |
| 1                 | 0.990   | 1.01 | 0.995   | 1.01 | 0.989   | 1.01 | 0.974                | 0.07 | 0.965   | 0.06 | 0.973   | 1.00 | 0.964   | 1.06 | 0.992   | 1.00 | 0.994       | 1.01 | 0.990   | 1.10 |
| 2                 | 0.992   | 1.01 | 0.995   | 1.01 | 0.990   | 1.01 | 0.972                | 0.07 | 0.968   | 0.07 | 0.976   | 1.00 | 0.967   | 1.06 | 0.990   | 1.00 | 0.995       | 1.01 | 0.989   | 1.10 |
| 3                 | 0.993   | 1.01 | 0.994   | 1.02 | 0.989   | 1.01 | 0.968                | 0.08 | 0.964   | 0.07 | 0.974   | 1.00 | 0.973   | 1.06 | 0.990   | 1.01 | 0.992       | 1.01 | 0.989   | 1.10 |
| 4                 | 0.970   | 1.01 | 0.985   | 1.02 | 0.971   | 1.02 | 0.970                | 0.09 | 0.960   | 0.00 | 0.978   | 1.02 | 0.963   | 1.05 | 0.992   | 1.01 | 0.980       | 1.01 | 0.990   | 1.10 |
| 5                 | 0.957   | 1.01 | 0.967   | 1.03 | 0.944   | 1.03 | 0.974                | 0.09 | 0.973   | 1.01 | 0.982   | 1.01 | 0.948   | 1.05 | 0.988   | 1.01 | 0.966       | 1.02 | 0.987   | 1.10 |
| 6                 | 0.947   | 1.01 | 0.951   | 1.04 | 0.940   | 1.04 | 0.934                | 0.09 | 0.957   | 1.01 | 0.983   | 1.01 | 0.953   | 1.06 | 0.988   | 1.01 | 0.954       | 1.02 | 0.985   | 1.10 |
| 7                 | 0.952   | 1.01 | 0.955   | 1.04 | 0.956   | 1.05 | 0.842                | 1.01 | 0.964   | 1.03 | 0.985   | 1.02 | 0.940   | 1.06 | 0.991   | 1.01 | 0.962       | 1.03 | 0.990   | 1.10 |
| 8                 | 0.946   | 1.01 | 0.943   | 1.05 | 0.953   | 1.05 | 0.852                | 1.02 | 0.966   | 1.04 | 0.983   | 1.02 | 0.935   | 1.05 | 0.990   | 1.01 | 0.954       | 1.03 | 0.990   | 1.10 |
| 9                 | 0.939   | 1.01 | 0.933   | 1.05 | 0.947   | 1.05 | 0.941                | 1.02 | 0.974   | 1.04 | 0.984   | 1.02 | 0.927   | 1.05 | 0.988   | 1.01 | 0.942       | 1.04 | 0.990   | 1.10 |

Catatan: semua koefisien korelasi di atas memiliki tanda negatif

Tabel 4.11. Koefisien korelasi silang dan *time lag* antara perubahan kuat penerangan dengan perubahan suhu air/tanah

| Posisi<br>pengukur<br>an | Koefisien korelasi dan <i>time lag</i> menurut lokasi dan transek |         |           |         |           |         |                      |         |           |         |           |         |           |         |           |         |             |         |           |         |
|--------------------------|---|---------|-----------|---------|-----------|---------|----------------------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-------------|---------|-----------|---------|
|                          | Desa Talengen   |         |           |         |           |         | Desa Ratatotok Timur |         |           |         |           |         |           |         |           |         | Desa Arakan |         |           |         |
|                          | Trans-1   |         | Trans-2   |         | Trans-3   |         | Trans-1              |         | Trans-2   |         | Trans-3   |         | Trans-4   |         | Trans-5   |         | Trans-1     |         | Trans-2   |         |
|                          | koef  | t-l     | koef      | t-l     | koef      | t-l     | koef                 | t-l     | koef      | t-l     | koef      | t-l     | koef      | t-l     | koef      | t-l     | koef        | t-l     | koef      | t-l     |
| 1                        | 0.88<br>7   | 1.<br>3 | 0.94<br>8 | 1.<br>7 | 0.94<br>6 | 1.<br>7 | 0.94<br>2            | 1.<br>8 | 0.94<br>1 | 1.<br>4 | 0.85<br>9 | 1.<br>5 | 0.87<br>5 | 1.<br>5 | 0.91<br>7 | 1.<br>9 | 0.97<br>8   | 1.<br>2 | 0.94<br>5 | 1.<br>3 |
| 2                        | 0.87<br>7   | 1.<br>3 | 0.94<br>3 | 1.<br>6 | 0.94<br>0 | 1.<br>6 | 0.91<br>0            | 1.<br>9 | 0.94<br>2 | 1.<br>5 | 0.87<br>9 | 1.<br>4 | 0.86<br>9 | 1.<br>5 | 0.91<br>9 | 1.<br>8 | 0.96<br>9   | 1.<br>2 | 0.94<br>5 | 1.<br>3 |
| 3                        | 0.88<br>2   | 1.<br>3 | 0.95<br>7 | 1.<br>7 | 0.95<br>4 | 1.<br>7 | 0.96<br>3            | 2.<br>0 | 0.97<br>6 | 1.<br>3 | 0.92<br>4 | 1.<br>5 | 0.88<br>2 | 1.<br>6 | 0.92<br>2 | 1.<br>8 | 0.97<br>9   | 1.<br>2 | 0.94<br>3 | 1.<br>3 |
| 4                        | 0.91<br>4   | 1.<br>5 | 0.95<br>2 | 1.<br>7 | 0.97<br>2 | 1.<br>8 | 0.93<br>5            | 2.<br>3 | 0.91<br>3 | 1.<br>6 | 0.85<br>5 | 1.<br>8 | 0.86<br>3 | 1.<br>6 | 0.95<br>1 | 1.<br>8 | 0.97<br>2   | 1.<br>3 | 0.97<br>8 | 1.<br>3 |
| 5                        | 0.86<br>5   | 1.<br>4 | 0.95<br>8 | 1.<br>7 | 0.95<br>6 | 1.<br>7 | 0.90<br>9            | 2.<br>3 | 0.91<br>0 | 1.<br>5 | 0.77<br>0 | 1.<br>6 | 0.87<br>1 | 1.<br>8 | 0.96<br>2 | 1.<br>7 | 0.89<br>5   | 1.<br>5 | 0.95<br>6 | 1.<br>3 |
| 6                        | 0.92<br>0   | 1.<br>3 | 0.96<br>3 | 1.<br>7 | 0.96<br>3 | 1.<br>7 | 0.91<br>3            | 2.<br>3 | 0.84<br>7 | 1.<br>5 | 0.85<br>1 | 1.<br>6 | 0.86<br>5 | 1.<br>8 | 0.95<br>6 | 1.<br>7 | 0.86<br>7   | 1.<br>4 | 0.93<br>8 | 1.<br>1 |
| 7                        | 0.93<br>1   | 1.<br>3 | 0.97<br>1 | 1.<br>8 | 0.97<br>1 | 1.<br>8 | 0.88<br>4            | 2.<br>4 | 0.89<br>3 | 1.<br>7 | 0.83<br>6 | 1.<br>5 | 0.84<br>9 | 1.<br>6 | 0.94<br>6 | 1.<br>7 | 0.86<br>5   | 1.<br>3 | 0.92<br>8 | 1.<br>3 |
| 8                        | 0.91<br>2   | 1.<br>4 | 0.95<br>4 | 2.<br>1 | 0.95<br>2 | 2.<br>0 | 0.87<br>5            | 2.<br>4 | 0.88<br>3 | 1.<br>7 | 0.84<br>9 | 1.<br>6 | 0.88<br>0 | 1.<br>6 | 0.95<br>1 | 1.<br>8 | 0.81<br>5   | 1.<br>3 | 0.94<br>4 | 1.<br>2 |
| 9                        | 0.91<br>7   | 1.<br>5 | 0.96<br>3 | 1.<br>9 | 0.96<br>4 | 1.<br>9 | 0.89<br>8            | 2.<br>4 | 0.86<br>5 | 1.<br>6 | 0.82<br>9 | 1.<br>6 | 0.84<br>6 | 1.<br>6 | 0.94<br>9 | 1.<br>8 | 0.84<br>1   | 1.<br>4 | 0.94<br>6 | 1.<br>2 |

## BAB V PENUTUP

### Kesimpulan

1. Ekosistem hutan mangrove bersifat khusus sebagai hutan yang bertumbuh diperairan pantai
2. Terdapat berbagai jenis mangrove dan ekotipe mangrove yang bertumbuh pada substrat yang bervariasi, terutama dalam hal suplai lumpur
3. Penelitian iklim mikro hutan mangrove penting dilakukan terkait dengan karakterisasi, pemantauan perubahan ekosistem dan lingkungan berbatasan
4. Penelitian iklim mikro hutan mangrove didasarkan pada variabel-variabel fisis yang mempengaruhi proses termal dalam ekosistem maupun antara ekosistem dengan lingkungan berbatasan.
5. Penelitian iklim mikro hutan mangrove didasarkan pada pengukuran parameter iklim mikro untuk variabel: suhu udara, kelembaban udara, intensitas penyinaran, suhu air/lumpur. Variabel-variabel iklim mikro bersifat interaktif satu sama lain dalam menentukan kuantitas parameter-parameter iklim mikro.
6. Konsep dan metode pengukuran parameter iklim mikro di hutan mangrove mengadopsi konsep dan metode pengukuran iklim mikro di hutan
7. Model difusi termal ini dapat digunakan dalam ekosistem yang sumber energi termalnya adalah matahari. Fungsi termal ini direpresentasikan oleh perubahan komponen temporal dan spasial variabel iklim mikro sebagai indikator kondisi termal dan difusi termal dalam ekosistem dan antara ekosistem dengan lingkungan. Model matematik perubahan temporal dan spasial iklim mikro menghasilkan sistem data parameter iklim mikro meliputi: nilai maksimum, selisih maksimum tepi - interior, kedalaman efek tepi, gradien tepi variabel suhu dan kelembaban udara, serta luas bidang dinamika dan indeks dinamika harian gradien suhu udara, kelembaban udara dan suhu air/tanah serta *time lag* antara perubahan kuat penerangan perubahan suhu udara dan kelembaban udara.
8. Sistem data parameter iklim mikro, dapat membedakan respons ekosistem mangrove dan lingkungan terhadap penyinaran, sehingga dapat digunakan untuk mengkarakterisasi dan mengelompokkan hutan mangrove berdasarkan karakteristik ekosistem dan lingkungan berbatasan. Perbedaan kondisi ekosistem dan lingkungan yang teridentifikasi melalui sistem data parameter iklim mikro adalah: struktur hutan mangrove (lebar hutan mangrove, adanya celah dan tambalan), kerapatan kanopi dan kondisi lingkungan berbatasan (laut, jalan aspal, pantai bervegetasi atau tanpa vegetasi). Perbedaan nilai dan rentang nilai parameter iklim mikro akibat perbedaan kondisi ekosistem dan lingkungan, menunjukkan potensi pemanfaatan sistem data parameter iklim mikro untuk pemantauan dan evaluasi dini perubahan energi termal dalam ekosistem mangrove dan lingkungan berbatasan. Kesimpulan khusus berkaitan dengan pengembangan dan penerapan parameter iklim mikro dalam mengkarakterisasi iklim mikro hutan mangrove adalah:
  - a. Parameter nilai maksimum iklim mikro, menunjukkan nilai tertinggi data hasil pemodelan temporal variabel iklim mikro. Keunggulannya terhadap cara penentuan parameter nilai maksimum sebelumnya, adalah ketepatan perolehan nilai maksimum sebagai nilai ekstrim fungsi temporal. Parameter ini dapat menentukan nilai maksimum variabel iklim mikro untuk setiap posisi sepanjang transek.
  - b. Parameter selisih maksimum variabel iklim mikro antara tepi dengan interior hutan mangrove. Keunggulannya terhadap cara penentuan parameter selisih maksimum sebelumnya, adalah ketepatan perolehan nilai selisih maksimum antara nilai fungsi temporal di tepi dengan interior. Parameter ini dapat membedakan kondisi ekosistem (kerapatan kanopi, adanya celah dan tambalan) dan lingkungan berbatasan (laut, jalan

- aspal, pantai bervegetasi dan tanpa vegetasi). Pengelompokan transek berdasarkan parameter ini, bersesuaian untuk variabel suhu udara dan kelembaban udara.
- c. Parameter kedalaman efek tepi, yang dikembangkan peneliti dari fungsi gradien iklim mikro. Cara penentuan parameter ini (termasuk penetapan posisi pengukuran di lapangan), lebih efisien dan lebih terjamin ketelitiannya dibanding metode sebelumnya. Parameter kedalaman efek tepi dapat membedakan kondisi ekosistem (kerapatan kanopi, adanya celah dan tambalan) dan lingkungan berbatasan (laut, jalan aspal, pantai bervegetasi dan tanpa vegetasi). Pengelompokan transek berdasarkan parameter ini bersesuaian untuk variabel suhu udara dan kelembaban udara.
  - d. Parameter gradien tepi. Parameter gradien tepi dirumuskan peneliti untuk menganalisis interaksi termal ekosistem mangrove dengan lingkungan. Parameter gradien tepi ditentukan dari fungsi gradien, yang secara keseluruhan memberikan informasi: selisih maksimum iklim mikro di tepi (antara lingkungan dengan hutan mangrove), perubahan arah dan waktu terjadinya perubahan arah difusi termal. Parameter ini dapat membedakan kondisi ekosistem (kerapatan kanopi, adanya celah dan tambalan) dan lingkungan berbatasan (laut, jalan aspal, pantai bervegetasi dan tanpa vegetasi). Pengelompokan transek berdasarkan parameter ini bersesuaian untuk variabel suhu udara dan kelembaban udara.
  - e. Parameter luas bidang dinamika. Parameter luas bidang dinamika harian gradien iklim mikro, dirumuskan peneliti untuk menganalisis interaksi termal ekosistem mangrove dengan lingkungan selama satu hari. Parameter ini dapat membedakan kondisi ekosistem (kerapatan kanopi, adanya celah dan tambalan) dan lingkungan berbatasan (laut, jalan aspal, pantai bervegetasi dan tanpa vegetasi). Pengelompokan transek berdasarkan parameter ini bersesuaian untuk tiga variabel: suhu udara, kelembaban udara, suhu air/tanah.
  - f. Parameter indeks dinamika harian gradien iklim mikro. Nilai parameter ini tidak berbeda signifikan antar transek, tapi dapat menunjukkan kemampuan hutan mangrove mereduksi pengaruh termal lingkungan dan mengendalikan pelepasan energi termal hutan mangrove ke lingkungan. Perubahan indeks dinamika harian gradien iklim mikro potensial menunjukkan perubahan dalam ekosistem hutan mangrove dan lingkungan.
  - g. *Time lag* antara kuat penerangan dengan variabel iklim mikro lainnya, dikembangkan peneliti untuk menganalisis respons termal ekosistem mangrove terhadap penyinaran matahari. Parameter ini dapat membedakan kondisi ekosistem (kerapatan kanopi, adanya celah dan tambalan) dan lingkungan berbatasan (laut, jalan aspal, pantai bervegetasi dan tanpa vegetasi). Pengelompokan transek berdasarkan parameter ini bersesuaian untuk variabel: suhu udara dan kelembaban udara.

## DAFTAR PUSTAKA

- 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
- Alvala R.C.S., R. Gielow, H.R. da Rocha, H.C. Freitas, J.M. Lopes, A.O. Manzi, C. von Randow, M. Dias, O.M.R. Cabral and M.J. Waterloo. 2002. Intradial and seasonal variability of soil temperature, heat flux, soil moisture content, and thermal properties under forest and pasture in Rondonia. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 107: 1-20.
- 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.
- Anonymous. 2001. *Forest watch Indonesia*: Global Forest Watch. Bogor.
- 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 Lanka 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. Egnotovich 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
- Beltrami H. and L. Kellman. 2003. An examination of short- and long-term air-ground temperature coupling. *Global and Planetary Change*, 38: 291–303
- 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
- Brososke 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.
- Budiman S., R. Dewanti, C. Kusmana, 2002. Application of landsat-TM data and geographic information systems for inventorying the degradation of mangrove forest in east Kalimantan Province. PORSEC 2002 BALI Proceedings.
- 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 factors. *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
- Chantanaorrapint 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. 1993a. 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. 1993b. An empirical model for predicting diurnal air temperature gradients from edge into old-growth Douglas-fir forest. *Ecological Modelling*, 67: 179 - 198
- Chen J. 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. Brososke, B.L. Brookshire, and J. F. Franklin. 1999. Microclimate forest ecosystem and landscape ecology. *BioScience*, 49(4): 38 – 48
- Chen J., J. Benesty and Y. Huang. 2006. Time delay estimation in room acoustic environments: an overview. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 12: 1-19,



- 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.
- 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.
- Clough B.F. and R.G. Sim. 1989: Changes in gas exchange characteristics and water use efficiency of mangroves in response to salinity and vapour pressure deficit. *Oecologia*, 79 : 38–44.
- Coccosis H., 2001. Measuring environmental degradation. Part II : climate change (Coastal zone and marine areas pressure). Edward Elgar Pub., Inc. Northampton, Massachusetts, USA, p. 101 - 111
- Cogliatti C., L.Mattos, S. M. Fonseca. 2004.: Quantification of biomass and carbon in *Rhizophora* mangle, *Avicennia shaueriana* and *Laguncularia racemosa* at Itaipu lagoon, Niterói – RJ. In: VI Brazilian Ecosystems Symposium – Abstracts and Program, São Paulo Science Academy, INPA, São José dos Campos
- 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.
- Calogine D., J. Margerit, O. Sero-Guillaume. 1998. Characterisation of vegetation in forest fire models, in: Proceedings of the 3rd International Conference on Forest Fire Research, Coimbra, pp. 599–609.
- 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., 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.
- Dahdouh-Guebas F. and N. Koedam. 2008. Long-term retrospection on mangrove development using transdisciplinary approaches: A review. *Aquat. Bot.*, 89: 80–92.
- 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
- 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.
- Dixon, J. 1990. Valuation of mangroves. *Tropical coastal area management*, 4(3): 1-6.
- Dong J, J. Chen, K.D. Brososfske 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., T.J. Smith, and M.B. Robblee. 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.
- Drinkwater, K.F., A. Belgrano, A. Borja, A. Conversi, M. Edwards, C.H. Greene, G. Ottersen, A.J.Persing, and H. Walker. 2003. The respons of marine ecosystem to climate variability associated with the North Atlantic Oscillation. American Geophysical Union, Washington D.C
- Duke N.C. and E. Wolanski, 2001. Muddy coastal waters and depleted mangrove coastlines—Depleted seagrass and coral reefs. *In*, *Oceanographic Processes of Coral Reefs* (ed. E. Wolanski), CRC Press, Washington, D.C., pp. 77–91.
- 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. 2003. Influences of Temperature and Environmental Variables on the Distribution of Bull Trout within Streams at the Southern Margin of Its Range. *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.
- English J.T., C.S. Thomas, J.J.Marois and W.D. Gubler. 1989. Microclimate of grapevine canopies associated with leaf removal and control of botrytis bunch rotation. *Phytopathology*, 79: 395 - 401
- Evans L.C. 1998. *Partial Differential Equations*, American Mathematical Society, [ISBN 0-8218-0772-2](#)
- 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
- Federer C.A. 1971. Solar radiation absorption by leafless hardwood forests. *Agricultural Meteorology*, 9: 3-20.
- 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.
- Fritz J. 1991. *Partial Differential Equations* (4th ed.), Springer, ISBN 978-0387906096
- Fromard F., H. Puig, E. Mougín, 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
- 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.
- Giesen, W., S. Wulffraat, M. Zieren and L. Scholten. 2007. *Mangrove guidebook for Southeast 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.
- Giri Ch., and J. Muhlhausen, 2008. Mangrove forest distributions and dynamics in Madagascar. *Sensors*, 8 : 2104-2117.
- 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. 2003. The effect of thinning intensity on the below-canopy light environment in a Sitka spruce plantation. *Forest Ecology and Management*, 179: 341–349.
- 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): 86 – 102
- Hoffman L., I. E. Monroe I. E., E. Narváez, M. Ramos M., and D. D. Ackerly. 2006. Sustainability of Mangrove Harvesting: how do harvesters’ perceptions differ from ecological analysis?. *Ecology and Society*, 11(2): 14-15
- Hollins S.E. and P.V. Ridd. 1997. Evaporation over a tropical tidal salt flat. *Mangroves and Salt Marshes*, 1: 95–102.
- Hong, P.N., 2006. The Role of Mangrove and coral reef ecosystems in natural disaster mitigation and coastal life improvement. Agricultural Publishing House, Hanoi
- Hudspeth T. R., J. Farley, R. Moumans, 2009. Conference strand : economy valuing Philippine mangrove forests via ecological economics.
- 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.
- 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
- Johannes R.E. 1982. Traditional conservation methods and protected marine areas in Oceania. *Ambio.*, 11(5): 258-261.
- Kao W.Y., C.N. Shih, T.T. Tsai. 2004. Sensitivity to chilling temperatures and distribution differ in the mangrove species *Kandelia candel* and *Avicennia marina*. *Tree Physiol.*, 24: 859–864.
- Kapos V. 1995. Effects of isolation on the water status of forest patches in the Brazilian Amazon. *Journal of Tropical Ecology*, 5:173-185.
- 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

- Kaufmann K. W., and R. C. Thompson, 2005. Water temperature variation and the meteorological and hydrographic environment of Bocas del Toro, Panama. *Caribbean Journal of Science*, 41(3): 392-413.
- 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
- Kirnak H., T. H. Shorta and R.C. Hansen, 2002. Studies on the relationships among moisture tension, microclimate and transpiration rate of container grown *Acer rubrum* J. *Appl. Hort.*, 4(2): 65-69.
- 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. Whelanand 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.
- Laurance W.F, L.V. Ferreira, J.M. Rankin-de Merona, and S.G. Laurance. 1998. Rainforest fragmentation and the dynamics of Amazonian tree communities. *Ecology*, 79: 2032–2040.
- Laurance W.F. 2002. Hyperdynamism in fragmented habitats. *Journal Vegetatuon 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. Manag.*, 50: 252-264.
- 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.
- 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
- 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
- Mihailovic D.T., K. Alapaty, B. Lalic, I. Arsenic, B. Rajkovic and S. Malinovi. 2004. Turbulent Transfer Coefficients and Calculation of Air Temperature inside Tall Grass Canopies in Land–Atmosphere Schemes for Environmental Modeling. *J. Appl. Meteor.*, 43: 1498–1514.
- 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
- Murcia C. 1995. Edge effects in fragmented forests: implications for conservation. *Trends in Ecology and Evolution*, 10(2) :58-62.
- Murphy-Klassen H.M., T.J. Underwood, S.G. Sealy and A.A. Czyrnyj. 2005. Long-term trends in spring arrival dates of migrant birds at Delta Marsh, Manitoba, in relation to climate change. *Auk*, 122: 1130–1148
- 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 B.W., V. Kapos, J. Adams, W. Oliveira. 1994. Forest disturbance by large blowdowns in the Brazilian Amazon. *Ecology*, 75: 853–858.
- 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.

- North, M., B. Oakley, R. Fiegener, 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
- Oliphant A.J., C.S.B. Grimmond, H.N. Zutter, H.P. Schmid, H.B. Su, S.L. Scott, B. Offerle, J.C. Randolph and J. Ehman. 2004. Heat storage and energy balance fluxes for a temperate deciduous forest. *Agric. Forest Meteorol.*, 126: 185-201.
- Örlander G. and O. Langvall. 1993. The ASA Shuttle – A system 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.
- 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 *Parasarma 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.
- 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
- Raghubanshi A.S. and Tripathi A. 2009. Effect of disturbance, habitat fragmentation and alien invasive plants on floral diversity in dry tropical forests of Vindhyan highland: a review. *Tropical Ecology*, 50(1): 57-69
- 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.
- 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
- 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
- Saenger P. 1998. Mangrove vegetation: An evolutionary perspective. *Marine and Freshwater Research*, 49(4): 277-286.
- 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
- Saxena M, 2007 : Microclimate modification calculating the effect of trees on air temperature. Heschong Mahone Group 11626 Fair Oaks Blvd. #302 Fair Oaks, CA 95628
- 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. 2002. Ekosistem mangrove sebagai kawasan peralihan ekosistem perairan tawar dan perairan laut. *Enviro.*, 2 (1): 25-40.
- 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
- Somerville A., 1980. Wind stability: forest layout and silviculture. *New Zealand J For Sci.*, 10: 476–501.
- 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.
- Stevens P.W., S.L. Fox, C.L. Montague. 2006. The interplay between mangroves and saltmarshes at the transition between temperate and subtropical climate in Florida. *Wetlands Ecol. Manage.*, 14: 435–444.
- Stuart S.A., B. Choat, K.C. Martin, N.M.Holbrook and M.C. Ball. 2007. The role of freezing in setting the latitudinal limits of mangrove forests. *New Phytol.*, 173: 576–583.

- 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
- Sun Y.T. 2011. Solution of convolution integrals and correlation functions via block pulse functions. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 4(1): 31-38
- Sweeney, 2001. Measuring environmental degradation. Part II : climate change Edward Elgar Pub., Inc. Northampton, Massachusetts, USA, p : 39 - 47.
- Tamatamah R.A. 2007 Environmental flow assessment (EFA) Wami River Basin, Tanzania. Literature review for BBM Workshop 2007. Wami-Ruvu Basin Water Office
- 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 P.G. Murphy. 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
- Victor, S., Y. Golbuu, E. Wolanski, RH Richmond. 2004. Fine sediment trapping in two mangrove-fringed estuaries exposed to contrasting land-use intensity, Palau, Micronesia. *Wetlands Ecology and Management*. 12: 277-283.
- von Storch H. and F. W Zwiers. 2001. *Statistical analysis in climate research*. Cambridge Univ Press. ISBN 0521012309.
- 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.
- Wang, Z.H., E. Bou-Zeid, J.A. Smith. 2011. A spatially-analytical scheme for surface temperatures and conductive heat fluxes in urban canopy models. *Boundary-Layer Meteorol.*, 138: 171-193.
- 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.
- Wen J. and P. Li. 2007. A new method for unbiased time-delay estimation in noisy environments", *Int. J. Adapt. Control Signal Process*, DOI: 10.1002/acs.951.
- 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., 1992. Hydrodynamics of mangrove swamps and their coastal water. *Hydrobiologia*, 247: 141 – 161
- Wolanski E. 2007. Protective functions of coastal forests and trees against natural hazards. *In*, Coastal Protection in the Aftermath of the Indian Ocean Tsunami: What Role for Forests and Trees?, FAO, Rome
- 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

- 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
- 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., 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: 119-129