

HIDROLOGI LAHAN GAMBUT DAN PERANANNYA DALAM KELESTARIAN LAHAN GAMBUT TROPIS

Dipa Satriadi Rais

Wetlands International – Indonesia Programme

E-mail : elitelongbowman77@yahoo.com

ABSTRAK

Terdapat sekitar 27 juta hektar lahan gambut di Asia Tenggara, 21 juta hektar (78 persen) diantaranya berada di Indonesia. Lahan gambut Indonesia terutama tersebar di Sumatra (7.2 juta hektar), Kalimantan (5.8 juta hektar) dan Papua (8 juta hektar). Lahan gambut Indonesia diperkirakan berumur 3000 s/d 30000 tahun. Lahan gambut merupakan ekosistem yang rapuh karena saling-ketergantungan antara gambut dan vegetasi penutupnya sangat erat, jauh lebih erat dibandingkan lahan-lahan kering. Gambut berasal dari akumulasi bahan organik dalam lingkungan jenuh air. Kelestariannya sangat tergantung pada rezim hidrologi dimana gambut berada dan keberlanggasungan siklus karbon di dalam sistemnya. Sebagai ekosistem rapuh gangguan kecil dapat barakibat kerusakan fatal, karena topografi dan batas tangkapan sangat mudah berubah, sedangkan terputusnya siklus karbon dapat berakibat kepunahan gambut. Gambut umumnya dicirikan oleh topografi yang sangat datar (lereng umumnya <0.1%), menempati dua atau lebih tangkapan (terutama gambut-gambut berkubah), dan menyimpan karbon dalam jumlah besar, lebih dari 2/3 berada dalam substrat gambut. Pada lahan gambut yang masih baik muka air tanah berada dekat permukaan tanah hampir sepanjang tahun. Muka air tanah jarang jatuh lebih dari 1 m dibawah permukaan tanah pada musim kemarau, sedangkan banjir adalah kondisi alami pada musim hujan. Pada lokasi yang dekat sungai-sungai besar perilaku banjir lebih ditentukan oleh tinggi muka air sungai, semakin jauh dari sungai perilaku gengangan lebih ditentukan oleh lereng dan tahanan hidrolik. Input utama pada lahan gambut adalah curah hujan. Masukan dalam bentuk aliran permukaan maupun bawah permukaan sangat terbatas karena lereng yang sangat datar. Keluaran utama adalah evapotranspirasi dan aliran permukaan. Keluaran dalam bentuk aliran bawah permukaan merupakan komponen sangat kecil, umumnya kurang dari 5% dari masukan kotor, disebabkan gradien hidrolik yang sangat kecil. Walaupun demikian aliran bawah permukaan ini sangat penting dalam mempertahankan aliran dasar pada sistem sungai yang dipasok dari lahan gambut. Karena keluaran utama adalah aliran permukaan maka sistem sungai di lahan gambut bersifat sangat flushy, muka air dan debit sungai naik sangat cepat di musim hujan. Pada tingkatan-tingkatan yang tinggi banyak sungai-sungai kecil lahan gambut yang bersifat intermittent, berair hanya di musim hujan dan kering di musim kemarau. Emisi karbon dan subsidensi adalah dampak yang nyata dari kerusakan hidrologi lahan gambut. Model proxy emisi karbon dan subsidensi merupakan salah satu pendekatan efektif dalam mempelajari kedua subjek ini. Suatu model subsidensi dengan melibatkan variabel bulk density dan kehilangan massa gambut dipaparkan dalam artikel ini.

Kata kunci : lahan gambut, sumberdaya air, hidrologi

ABSTRACT

There are approximately 27 million ha of peatlands in Southeast Asia, 21 million ha (78%) of them are in Indonesia. Peatlands are mainly distributed in Sumatra, Indonesia (7.2 million ha), Kalimantan (5.8 million ha) and Papua (8 million ha). Indonesia's peatlands was estimated to be 3000 s / d 30 000 years. Peatland ecosystems are fragile because of interdependence between the peat and vegetation cover is very tight, much tighter than the dry land. Peat from the accumulation of organic matter in water-saturated environment. Sustainability is

highly dependent on the hydrological regime in which it resides and the sustainability of the carbon cycle within the system. As a fragile ecosystem, a small disturbance can cause the most damage, because the topography and the catchment boundary is highly volatile, while the breaking of the carbon cycle can lead to extinction of peat. Peat is generally characterized by very flat topography (slopes generally <0.1%), occupying two or more catchments (especially domed peat-peat), and store large amounts of carbon, more than 2 / 3 are in a peat substrate. In the peatlands are still healthy water table is near the soil surface most of the year. Groundwater rarely fall more than 1 m below the ground surface during the dry season, while flooding is a natural condition during the rainy season. At a location near large rivers, flooding behavior is determined more by the high river water, the farther from the river pool of behavior is more determined by the slope and hydraulic resistance. The main input to the peatland is rainfall. Put in the form of surface and subsurface flow is very limited because the slope is very flat. The main outputs are evapotranspiration and runoff. Output in the form of subsurface flow is a small component, generally less than 5% of the gross input, due to a very small hydraulic gradient. Nevertheless subsurface flow is very important in maintaining base flow in river systems which are supplied from peatlands. Since the main output is the surface flow in the river system is highly flushy peatlands, the water level and river discharge increased very rapidly in the rainy season. At high levels of many small streams that are intermittent peat, watering only in the rainy season and dry in the dry season. Carbon emissions and subsidence is the real impact of the destruction of peatland hydrology. Proxy model and subsidence of carbon emissions is one effective approach in studying the subject. A subsidence model involving variable bulk density and loss of peat mass presented in this article.

Keywords: peatland, water resources, hydrology

PENDAHULUAN

Hutan rawa gambut dicirikan oleh keberadaan tanah gambut dimana vegetasi yang tumbuh diatasnya merupakan sumber materi pembentuk tanah itu sendiri (Wösten *et al*, 2006). Hutan rawa gambut juga dikenal sebagai cadangan karbon yang sangat penting (Andriesse, 1988; Page dan Rieley, 1998), memainkan fungsi sebagai penyediabagai sumberdaya alam dan memiliki peran potensial sebagai salah satu regulator iklim global. Sebagai salah satu cadangan karbon terestrial terbesar di muka bumi, keberadaan hutan rawa gambut mencegah cadangan karbon raksasa ini terlepas ke atmosfir. Hutan rawa gambut sebagai sistem karbon yang dinamis dimana hidrologi menjadi salah satu kunci pengatur keberadaan dan kelestariannya. Untuk itu ada dua definisi penting yang perlu dikemukakan terlebih dahulu. Lahan gambut adalah bagian dari lahan basah yang dicirikan oleh keberadaan tanah gambut, sedangkan hutan rawa gambut adalah totalitas dari lahan gambut dan hutannya.

Luas total lahan gambut di Asia Tenggara ditaksir sekitar 33 juta hektar pada tahun 1990, sekitar 82% diantaranya (27 juta hektar) berada di Indonesia (RePPProT, 1990). Pada tahun 2002 luas lahan gambut Asia Tenggara dilaporkan sekitar 27 juta hektar, sedangkan lahan gambut Indonesia sekitar 21 juta hektar. Lahan gambut di Indonesia tersebar pada kawasan pantai dan dataran rendah di tiga pulau utama: Sumatra (7.2 juta hektar), Kalimantan (5.8 juta hektar) dan Papua (8 juta hektar) (Wahyunto *et al*, 2006; Wetlands International - Indonesia Programme, 2003; 2004). Angka-angka diatas diduga akan terus berkurang disebabkan kecenderungan terus berlangsungnya konversi dan degradasi di sejumlah besar lahan gambut yang masih tersisa. Tekanan pertumbuhan penduduk, merosotnya lahan pertanian di pulau Jawa dan meningkatnya kebutuhan lahan untuk industri dan pengembangan perkotaan menimbulkan dorongan kuat untuk mereklamasi dan mengembangkan lahan gambut dataran rendah di Indonesia (Andriesse, 1988; Rieley *et al.*, 1996).

Hidrologi hutan rawa gambut ditentukan oleh iklim, topografi, limit drainase (drainage base), subsoil dan tutupan vegetasi. Reklamasi lahan gambut di Indonesia (yang terbukti menimbulkan sejumlah dampak yang terkadang bersifat transnasional) menyebabkan berubahnya satu atau beberapa faktor tersebut atau berubahnya respon sistem terhadap faktor-faktor tersebut. Ancaman utama yang timbul dari reklamasi lahan gambut adalah hilangnya vegetasi hutan rawa gambut atau beralih ke tutupan monokultur, dan menurunnya muka air tanah akibat kanal-kanal drainase buatan. Dampak utama yang segera mengikuti adalah meningkatnya emisi gas rumah kaca, perubahan topografi oleh subsiden, berbagai gangguan ekologi seperti hilangnya habitat berbagai spesies (termasuk berbagai spesies yang terancam punah dan dilindungi), dan hilangnya fungsi penyediaan sumberdaya alam. Contoh khusus dari Kalimantan Tengah dan Jambi akan ditampilkan dalam artikel ini dengan penekanan pada hidrologi dan hubungannya dengan emisi karbon dan subsiden.

KARAKTERISTIK LAHAN GAMBUT

Ketebalan lahan gambut di Indonesia biasanya berkisar antara 1 m sampai 8 m, tapi tidak jarang ditemukan angka yang mencapai 12 m – 24 m, seperti di lahan gambut Air Hitam Laut di Jambi dan Giam Siak di Riau. Tiga tipe lahan gambut utama di Indonesia adalah gambut cekungan berkubah, gambut teras dan gambut

pantai (Gambar 1 dan 2 memperlihatkan contoh gambut teras dan gambut cekungan berkubah di Kalimantan Tengah). Gambut cekungan berkubah biasanya lebih tebal dari tipe lainnya terutama (tetapi tidak harus) di bagian tengah kubah. Walaupun sebagian besar lahan gambut memperlihatkan profil elevasi yang menanjak ke arah tengah tetapi ciri kubah terlihat paling nyata pada gambut cekungan berkubah dibandingkan tipe lainnya. Gambut cekungan berkubah juga memiliki lereng lebih curam pada bagian tepi.

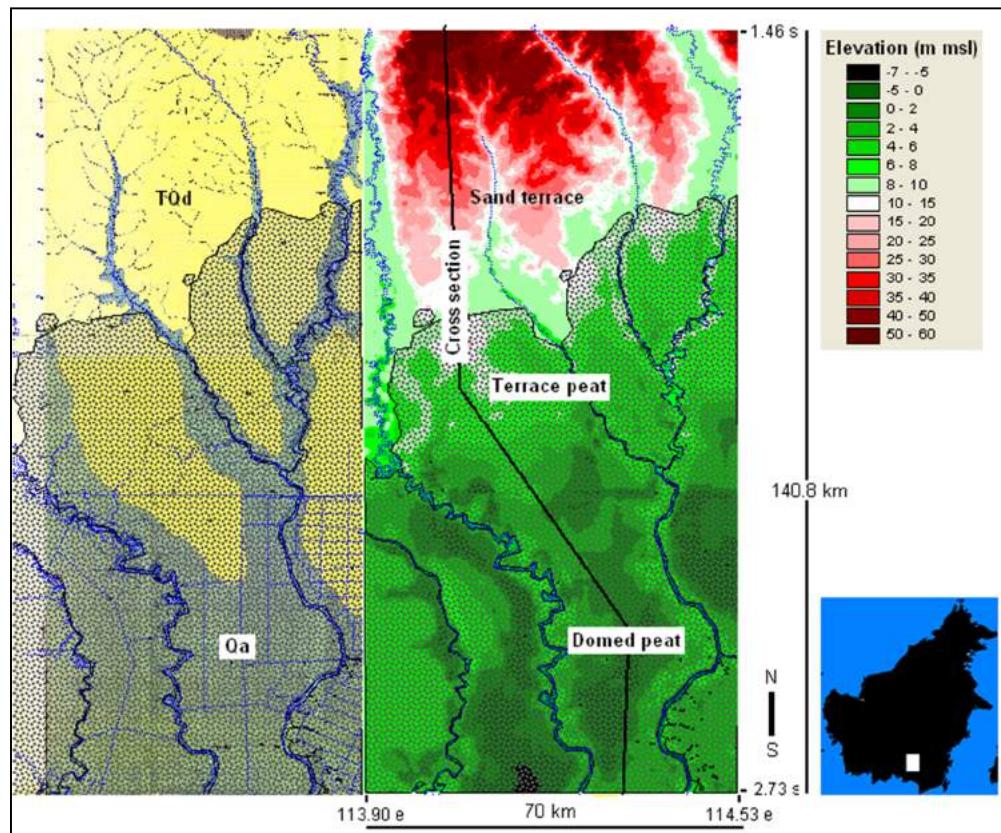
Gambut adalah akumulasi bahan organik yang berasal dari sisa-sisa vegetasi dalam kondisi tergenang. Dengan curah hujan tahunan yang tinggi (2000 mm – 5000 mm) genangan permanen dapat terjadi bila drainase terhambat akibat lereng yang datar. Dekomposisi bahan organik yang tidak sempurna pada kondisi tergenang ini menghasilkan berbagai senyawa asam sehingga pH menjadi rendah. Kondisi tergenang bersama-sama dengan pemasaman substrat merupakan suatu kondisi yang menyebabkan sisa-sisa tanaman terakumulasi lebih cepat dibandingkan terurai (Brady, 1997), yang kadang-kadang mampu mengawetkan sisa-sisa tanaman secara utuh, lengkap dengan kayu, kulit dan cabang-cabangnya.

Jumlah karbon yang tersimpan dalam hutan rawa gambut luar biasa besarnya, dimana lebih dari dua-pertiga berada dalam substrat gambut. Setiap hektar gambut setebal empat meter mengandung karbon kira-kira 1624 ton, dengan asumsi berat volum (*dry bulk density*) gambut sebesar 70 kg/m^3 dan kadar massa karbon 58%. Selanjutnya jika diasumsikan rata-rata ketebalan gambut di Indonesia adalah 4 meter, maka dapat diperkirakan bahwa total kandungan karbon yang tersimpan dalam 21 juta hektar lahan gambut di Indonesia adalah sekitar 34.1 Gigaton (1 Gigaton = 1 miliar ton). Ini belum termasuk karbon yang tersimpan dalam biomassa hutannya.

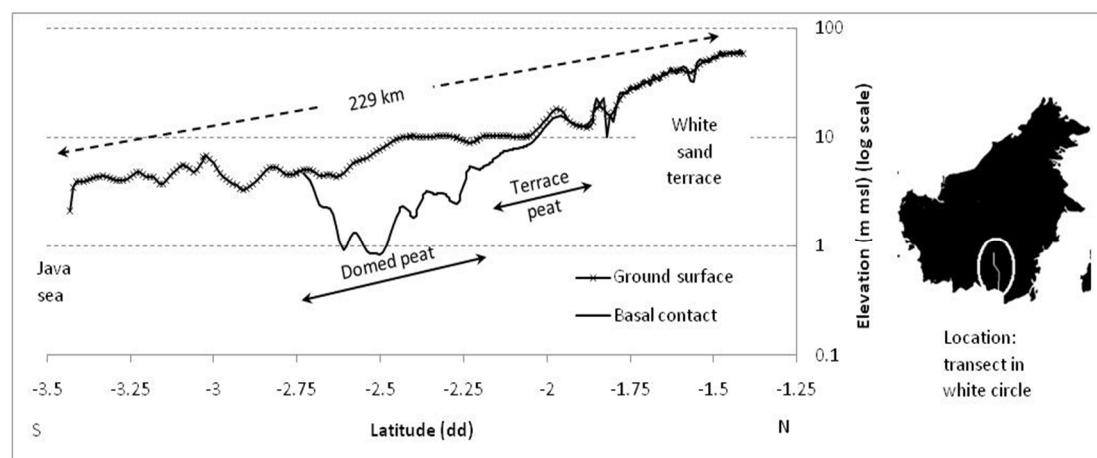
Lahan-lahan gambut Indonesia diperkirakan mulai terbentuk pada epik pleistosen – holosen. Para ahli menyebutkan angka yang bervariasi, berkisar dari 3.000 sampai 30.000 tahun yang lalu. Kajian terakhir dari Dommain *et al* (2011) menunjukkan adanya hubungan antara tipe distribusi dengan umur gambut. Mereka membedakan tipe distribusi lahan gambut antara gambut pedalaman dan gambut pantai, dan menunjukkan bahwa gambut pedalaman lebih tua dibandingkan gambut pantai. Temuan ini lebih mudah dipahami bila mengacu pada tafsiran bahwa pembentukan lahan gambut menyelarasi gerakan maju garis pantai (seperti model

Anderson, 1964) dan mengikuti penurunan muka laut. Tetapi model pergerakan maju garis pantai mensyaratkan bahwa setiap gambut memulai sejarah perkembangan dari mangrove, yang terbukti tidak selalu demikian (Furukawa, 1994). Dalam artikel ini digunakan klasifikasi yang berbeda berdasarkan sedimen pada *basal contact* dan morfologi cekungan, dimana gambut dibedakan atas tipe gambut pantai (*coastal peatland*), gambut cekungan berkubah (*basinal dome-shaped peatland*) dan gambut teras (*terrace peatland*). Sedangkan korelasi umur tidak terlalu dipersoalkan.

Gambut pantai memperoleh namanya berdasarkan kedekatannya dengan garis pantai (biasanya dalam rentang 60 km). *Basal contact* biasanya merupakan sedimen liat atau liat yang kaya kandungan organik yang dulunya merupakan dataran pasang surut dan sering mengandung senyawa belerang, dan merupakan salah satu indikator yang baik tentang sejarah perkembangannya yang berhubungan erat dengan *mangrove*. Lahan gambut cekungan berkubah biasanya terdapat pada cekungan datar diantara dua tanggul sungai dan memperlihatkan bentuk permukaan yang berkubah atau penampang vertikal yang seperti lensa. *Basal contact* biasanya terdiri atas sedimen liat yang diendapkan oleh banjir musiman di masa lalu. Lahan gambut teras biasanya terdapat pada pinggiran teras pegunungan, biasanya pada elevasi dibawah 20 m dari permukaan laut. *Basal contact* biasanya terdiri atas pasir atau tanah-tanah berpasir. Dimasa lalu, sebelum gambut berkembang diatasnya, tanah-tanah tersebut dapat digolongkan ke dalam *podzol* dengan tutupan vegetasi hutan. Dengan permeabilitas yang tinggi dan curah hujan yang juga tinggi tanah-tanah ini mengalami podzolisasi yang berlanjut. Saat drainase mulai terhambat pada periode kenaikan muka laut di masa lalu gambut mulai terbentuk. Furukawa (1994) memperkirakan bahwa gambut teras di Jambi mulai terbentuk selama transgresi laut di epik holosen sekitar 6800 tahun yang lalu. Dia juga menemukan bahwa gambut ini berkembang tanpa tanda-tanda kehadiran vegetasi mangrove.



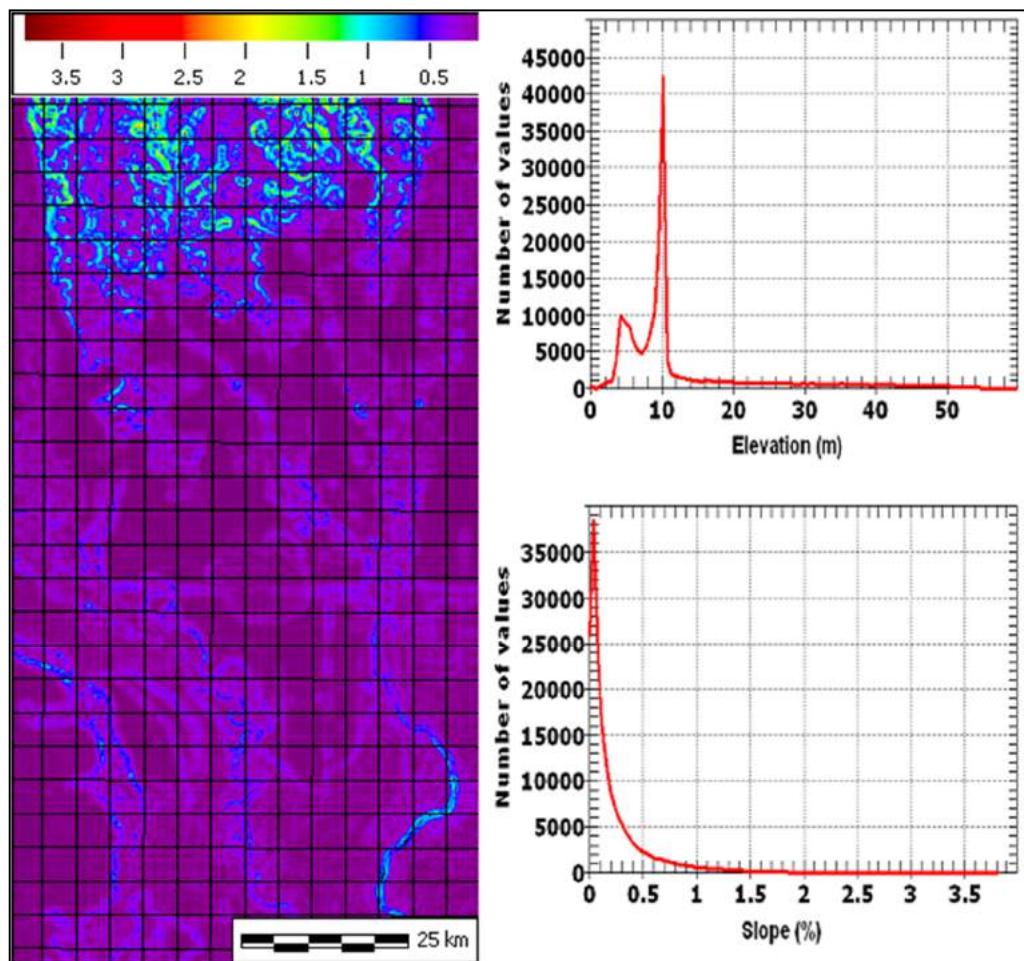
Gambar 1. Formasi geologi utama dalam areal Blok B dan E Eks PLG, Kalimantan Tengah (kiri), area lahan gambut dengan mengindikasikan lokasi gambut teras dan cekungan berkubah (kanan). Garis penampang lintang adalah yang diacu oleh gambar 2; Elevasi yang disajikan adalah elevasi permukaan lapisan mineral, bukan elevasi permukaan gambut.



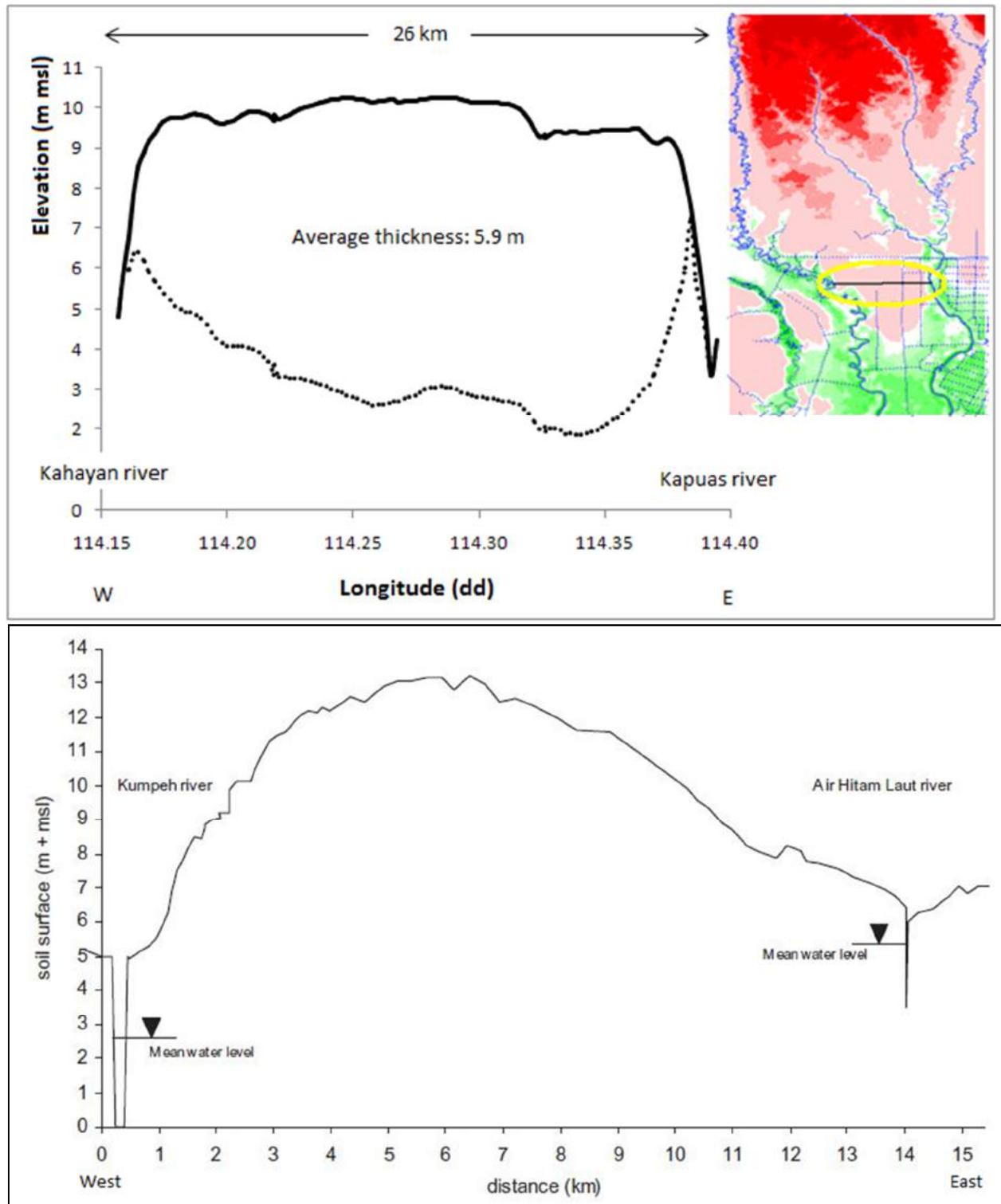
Gambar 2. Penampang lintang sepanjang garis yang diperlihatkan pada gambar 1, diperpanjang sampai ke laut Jawa

Relief mikro lahan gambut menunjukkan lebih sedikit variasi, lebih mulus dan kurang bergelombang dibandingkan lahan-lahan pada dataran tinggi. Drainase skala mikro dan meso ditandai oleh pola baur dimana air dapat mengalir ke berbagai arah

tanpa arah aliran yang jelas. Sungai-sungai kecil musiman (intermittent) dapat terbentuk, berpindah dan menghilang secara musiman. Lereng yang datar juga menjadi salah satu ciri lahan gambut yang cukup dikenal. Lereng datar menyebabkan batas tangkapan sulit dikenali di lapangan. Rata-rata kelerengan biasanya kurang dari 1m/km (sebagai contoh lihat Gambar 3). Pada lahan-lahan gambut berkubah kelerengan di tengah kubah biasanya lebih landai daripada di kaki kubah. Gambar 4 memperlihatkan dua contoh penampang lintang elevasi lahan gambut diantara dua sungai. Pada gambar pertama diperlihatkan penampang lintang antara dua sungai besar dengan kelerengan di tengah kubah yang nyata sangat landai, sementara gambar kedua memperlihatkan penampang lintang antara sebuah sungai besar di tanah mineral (Sungai Kumpeh) dan sungai lebih kecil di lahan gambut (Air Hitam Laut hulu). Gambar kedua merupakan kubah gambut yang lebih kecil, sementara yang lebih besar berada disebelah timur Air Hitam Laut. Dapat dikatakan sebenarnya kubah tersebut merupakan bagian dari kubah yang lebih besar. Permukaannya yang cembung, lahan gambut memperlihatkan suatu ciri lain yang sangat penting dari segi hidrologi: sebuah kubah gambut menempati beberapa tangkapan sekaligus (Ritzema dan Wösten, 2002) dan didrainase oleh lebih dari satu sungai. Dengan sendirinya ini akan memunculkan suatu segi penting dalam pertimbangan pengelolaannya, karena gambut merupakan bahan organik yang mengalami oksidasi dan subsiden bila didrainase. Konsekuensinya adalah batas tangkapan dapat berpindah jauh bila direklamasi, sehingga tangkapan lahan gambut mudah berubah dan terdegradasi, merubah neraca air kedua tangkapan, meskipun bila hanya satu tangkapan yang direklamasi.



Gambar 3. Distribusi lereng dalam areal terpilih di Blok B dan E Eks. PLG Kalimantan Tengah (areal yang sama seperti diperlihatkan pada gambar 1) (kiri), kurva kerapatan elevasi dan lereng (kanan)



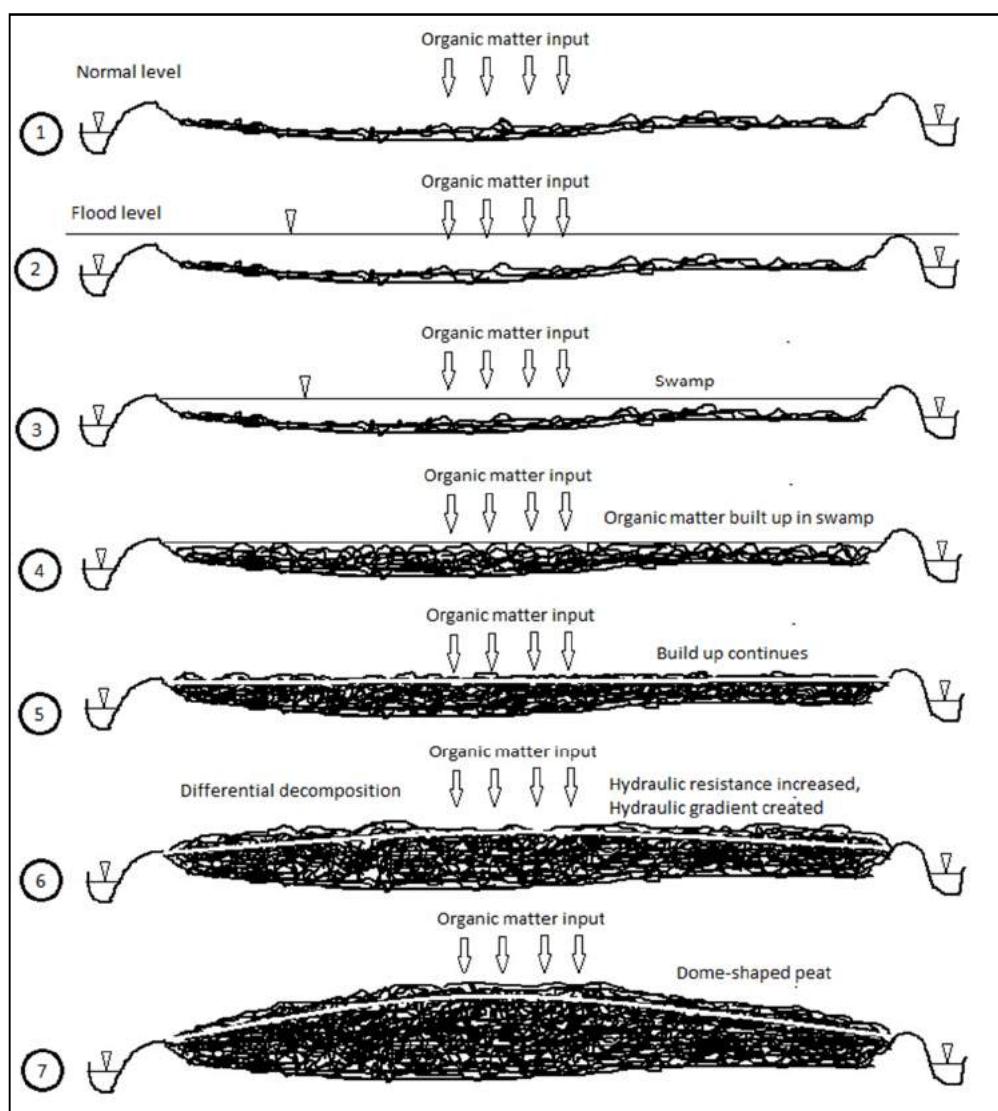
Gambar 4. Penampang lintang elevasi lahan gambut Blok B Eks. PLG, Kalimantan Tengah (atas) dan Air Hitam Laut, Jambi (bawah)

AKUMULASI DAN DEKOMPOSISSI BAHAN ORGANIK DI HUTAN RAWA GAMBUT

Agar lebih mudah menggambarkan saling-ketergantungan antara lahan gambut dan hutannya, mungkin perlu dikemukakan disini sebuah model sederhana perkembangan lahan gambut berkubah. Digambarkan sebagai dataran rendah diantara dua sungai yang mengalami banjir periodik dimasa lalu (Gambar 5). Tanggul sungai perlahan-lahan terbentuk di sisi-sisi sungai sedangkan partikel liat terbawa jauh masuk ke daratan dan mengendap jauh dari sungai. Ketika tanggul akhirnya cukup tinggi terbentuklah cekungan diantara dua sungai dan drainase jadi terhambat. Air banjir musiman tertahan di cekungan dan menjadi sebuah rawa dangkal. Sisa-sisa tumbuhan yang jatuh ke rawa terendam, setengah terdekomposisi dan lambat laun terakumulasi, sedangkan kemasaman laun meningkat. Laju akumulasi ini ditaksir sekitar 0.5 – 2 mm/tahun, (lihat Dommain *et al*, 2011 dengan kajian terakhir mereka yang juga mencakup subjek akumulasi bahan organik ini). Ketika tumpukan bahan organik semakin tebal dan semakin padat tahanan hidrolik meningkat dan diikuti oleh terbentuknya gradien hidrolik. Hal ini selanjutnya menyebabkan permukaan air menjadi cembung atau berkubah, lebih tinggi di tengah-tengah dan rendah di sepanjang pinggir di dekat tanggul-tanggul sungai. Dengan berlanjutnya akumulasi bahan organik sehingga tumpukan semakin tinggi, bagian atas akhirnya muncul ke permukaan air, terdahad ke udara sehingga mengalami laju dekomposisi yang lebih cepat. Bagian terdahad ini lebih tebal ke arah pinggir karena permukaan freatik yang cembung (berkubah). Laju masukan bahan organik dapat diasumsikan seragam secara spasial (tergantung pada tutupan vegetasi) sedangkan laju dekomposisi bersifat diferensial. Hal ini selanjutnya menyebabkan laju akumulasi bahan organik, yaitu selisih antara masukan dan dekomposisi, juga bersifat diferensial. Dengan berlanjutnya proses ini perlahan-perlahan terbentuklah gambut berkubah dan terjadi suksesi vegetasi ke spesies-spesies gambut. Kajian vegetasi berada diluar lingkup artikel ini, tentang subjek ini lihat umpamanya Cameron *et al* (1989).

Akumulasi diferensial bahan organik, seperti telah disampaikan, harus dipandang sebagai sebuah proses gabungan antara masukan dan dekomposisi bahan organik, yang masing-masing berlawanan. Disini kita melihat tinggi muka air tanah

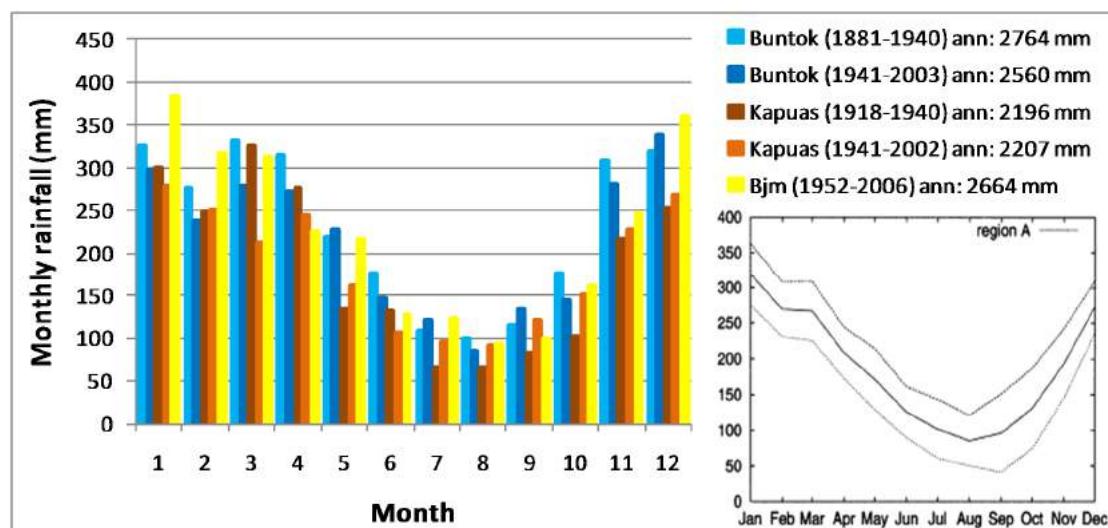
sebagai salah satu faktor penting yang mengatur proses gabungan tersebut. Dengan demikian model sederhana perkembangan gambut diatas memberikan gambaran umum bagaimana hidrologi berfungsi dalam kelestarian hutan rawa gambut. Yang menjadi fitur kunci adalah bahwa muka air tanah yang dangkal di lahan gambut dapat mempertahankan neraca karbon pada taraf imbang atau bahkan positif dengan mengurangi laju penguraian gambut. Ketika masukan bahan organik melebihi keluarannya maka gambut disebut tumbuh. Jika sebaliknya gambut tersebut dianggap sekarat dan vegetasi hutan yang tumbuh diatasnya terancam kehilangan relung. Saling-ketergantungan ini sangat erat, jauh lebih erat dibandingkan ekosistem lahan kering.



Gambar 5. Model sederhana tahap-tahap perkembangan gambut cekungan berkubah antara dua sungai (garis putih mewakili muka air tanah, vegetasi tidak diperlihatkan dalam gambar)

NERACA AIR LAHAN GAMBUT

Iklim dimana lahan gambut Indonesia berada, ditandai oleh temperatur yang seragam (rata-rata temperatur bulanan 24°C - 27°C), kelembaban tinggi (70% - 80%), dan curah hujan tahunan yang tinggi. Evapotranspirasi relatif konstan, sekitar separuh dari curah hujan kotor. Angka evapotranspirasi taksiran 3 mm/hari – 5 mm/hari sering digunakan, misalya seperti laporan Ritzema dan Wösten (2002). Aldrian dan Susanto (2003) mengusulkan adanya tiga wilayah curah hujan di Indonesia. Wilayah A (yang meliputi bagian tengah dan selatan Indonesia mulai dari Sumatra hingga pulau Timor, sebagian Borneo, sebagian Sulawesi, dan sebagian Papua) patut mendapat perhatian dalam artikel ini. Wilayah A mempunyai satu puncak dan satu lembah curah hujan bulanan, dengan musim hujan berlangsung dari November sampai Maret, dan musim kemarau dari Mai sampai September. Sebagian besar kawasan gambut berada dalam wilayah A ini, yang merupakan wilayah dengan musim kemarau terkering (rata-rata curah hujan bulanan musim kemarau <100 mm). Gambar 6 merupakan contoh curah hujan bulanan pada tiga stasiun di Kalimantan yang termasuk dalam wilayah A.



Gambar 6. Curah hujan bulanan terekam pada stasiun Buntok, Kuala Kapuas dan Banjarmasin di Kalimantan. Inzet: kurva curah hujan bulanan wilayah A menurut Aldrian dan Susanto (2003)

Curah hujan musiman memainkan peranan penting dalam hidrologi lahan gambut, khususnya curah hujan musim kemarau dan periode kering ketika evapotranspirasi melebihi curah hujan. Periode kering biasanya berlangsung 3 – 4

bulan, walaupun di Sarawak hanya berlangsung dua minggu (Ritzema dan Wösten , 2002). Meskipun hampir semua lahan gambut Indonesia mendapat curah hujan tahunan yang tinggi (>2000 mm), justru curah hujan musim kemarau dan lama periode kering lebih menentukan kelestarian lahan gambut, karena sebagian besar curah hujan yang masuk di musim hujan tersebut langsung terbuang sebagai debit keluar, sebagaimana dibahas nanti. Suatu tahun dengan curah hujan musim kemarau yang tinggi (walaupun curah hujan tahunannya rendah) menghasilkan simpanan dan *baseflow* musim kemarau yang lebih tinggi, dibandingkan curah hujan tahunan yang tinggi tetapi curah hujan musim kemaraunya rendah. Dengan kata lain distribusi curah hujan sepanjang tahun sangatlah menentukan.

Pada lahan-lahan gambut tropis dalam kondisi tidak jenuh, hampir semua curah hujan yang jatuh segera terinfiltasi karena konduktivitas hidrolik yang tinggi (mencapai 30 m/hari) pada lapisan atas (kira-kira 1 m lapisan teratas) (Takahashi dan Yonetani, 1997). Begitu gambut menjadi jenuh curah hujan yang jatuh selanjutnya mengalir di permukaan menuju sungai dan kanal-kanal drainase. Konduktivitas hidrolik yang tinggi disebabkan oleh karakteristik lapisan atas gambut tropis yang khas, terdiri dari sisa-sisa tumbuhan seperti tunggul, cabang dan akar yang bersifat hemik dan fibrik dan memiliki struktur pori terbuka dan berukuran besar (Silvius *et al.*, 1984). Tingginya konduktivitas hidrolik menyebabkan pembuangan air di musim hujan terjadi dengan cepat, walaupun dikombinasikan dengan rendahnya gradien hidrolik pada lahan gambut yang datar. Akibatnya hanya sebagian kecil ($<3\%$) dari curah hujan yang mampu berpenetrasi ke lapisan bawah (dibawah 1 m lapisan teratas) yang memiliki konduktivitas hidrolik lebih rendah, dan akhirnya memasuki subsoil mineral di bawah lapisan gambut (Hooijer, 2005).

Muka air tanah pada hutan rawa gambut yang masih utuh berada di permukaan tanah atau dekat permukaan tanah hampir sepanjang tahun. Setelah mengalami suatu rentang periode kering muka air tanah jatuh tidak lebih dari 100 cm di bawah permukaan tanah (Siderius, 2004), dan dalam banyak kasus bahkan tak lebih dari 60 cm (lihat Gambar 8 dan 9). Sebaliknya, kejatuhan muka air tanah sampai 200 cm di musim kemarau dapat terjadi pada lahan-lahan gambut yang didrainase. Jika kita gunakan angka 60 cm sebagai muka air tanah setelah suatu periode kering maka 600 mm curah hujan bersih sudah mencukupi untuk menjenuhkan suatu kolom tanah

gambut pada awal musim hujan (gambut memiliki porositas sangat tinggi, bisa lebih dari 90 persen); sisanya terbuang sebagai debit keluar dan penguapan. Karena curah hujan tropis memiliki intensitas tinggi, kondisi jenuh dapat dicapai dalam beberapa minggu, kadang-kadang dalam sehari. Ringkasnya, lahan gambut memiliki kapasitas simpan yang kecil. Sifat ini tercermin dari cepatnya kenaikan muka air tanah, dengan absennya detensi permukaan pada lahan-lahan gambut. Pembuangan yang cepat melalui limpasan permukaan yang terjadi setelah tercapainya kejenuhan tanah juga berakibat banjir yang *flushy*. Di dekat sungai-sungai besar level banjir secara langsung ditentukan oleh level muka air sungai, semakin jauh ke daratan lereng dan tahanan hidrolik memainkan peranan penting.

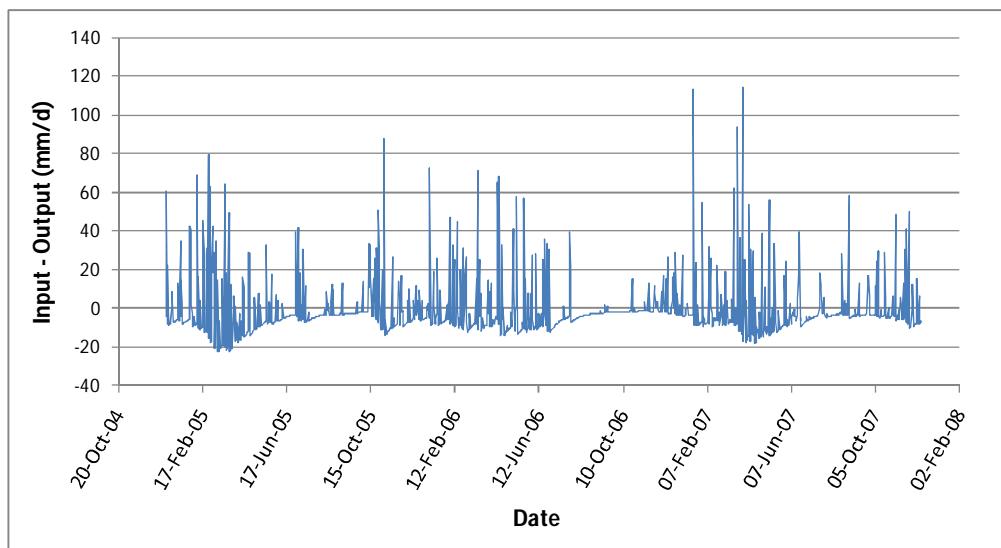
Neraca air lahan gambut alami biasanya dicirikan atas evapotranspirasi (+ intersepsi) sebagai komponen keluaran yang utama. Seperti ditemukan di blok A bagian utara Eks PLG (Rais, 2008) sekitar 58.6% dari curah hujan kotor hilang melalui evapotranspirasi dan intersepsi. Sekitar 40.7 persen dibuang melalui limpasan permukaan di musim hujan, sementara hanya 8.1 % sebagai *groundwater flow*. Juga terlihat bahwa kawasan tersebut mengalami defisit simpanan 7 persen dalam periode 3 tahun, yang kemungkinan besar disebabkan oleh keberadaan kanal-kanal drainase dan tahun yang relatif kering pada 2005 dan 2006. Tanpa penerapan konservasi air yang baik evapotranspirasi dapat menyebabkan defisit air yang berpanjangan (Ritzema dan Wösten, 2002). Tabel 1 menyajikan ringkasan neraca air dan pada Gambar 7 disajikan grafik dinamika simpanan pada lahan gambut blok A utara eks PLG di Kalimantan Tengah. Walaupun area ini tidak lagi dalam kondisi alami karena keberadaan kanal-kanal drainase yang ekstensif, neraca air yang ditemukan sedikit banyak masih memperlihatkan kemiripan dengan neraca air lahan gambut Air Hitam Laut (AHL) yang notabene relatif utuh. Di lahan gambut AHL Wösten *et al* (2006) menemukan bahwa 53 persen dari curah hujan kotor hilang melalui evapotranspirasi dan kurang dari 6 persen melalui *groundwater flow*.

Tabel 1. Neraca air blok A utara eks PLG di Kalimantan Tengah dalam milimeter (Rais, 2008)

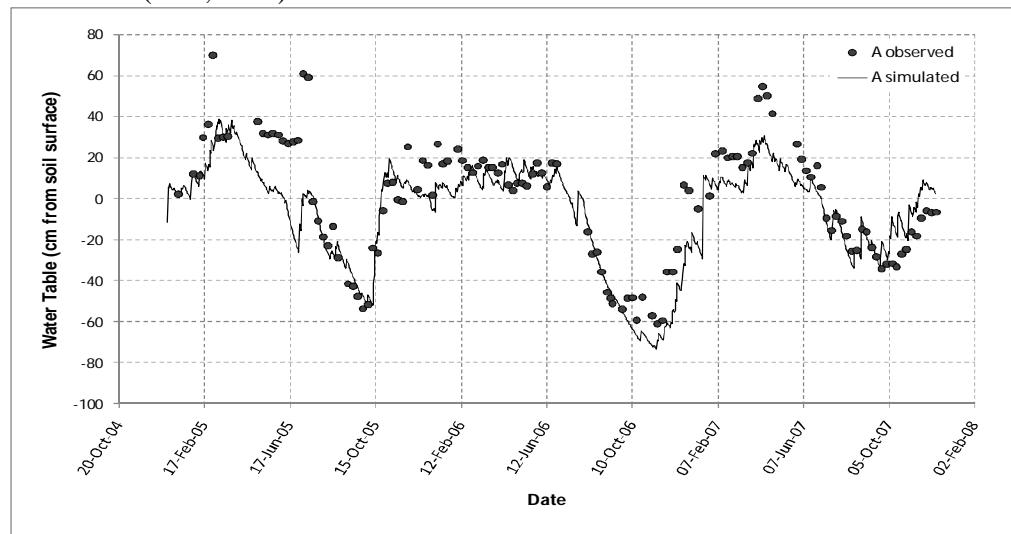
Component	I	II	III	IV	Kumulatif
Curah hujan (1)	2335	2866	2513	517	8230
Ground water flow (2)	170	250	198	45	664
Limpasan permukaan (3)	1161	1144	944	103	3352
Debit (4) = (2) + (3)	1331	1394	1142	148	4016
Evapotranspirasi (5)	1132	1493	1266	283	4175
Intercepsi (6)	183	225	197	41	646
ET+Intercepsi (7) = (5) + (6)	1315	1718	1464	324	4821
Perubahan simpanan (8) = (1) – (4) – (7)	-311	-247	-93	45	-607

Catatan:

I : 28 December 2004 – 30 September 2005, II : 1 October 2005 – 30 September 2006, III : 1 October 2006– 30 September 2007, IV : 1 October 2007 – 10 December 2007



Gambar 7. Dinamika perubahan simpanan Blok A utara Eks. PLG Kalimantan Tengah (Rais, 2008)

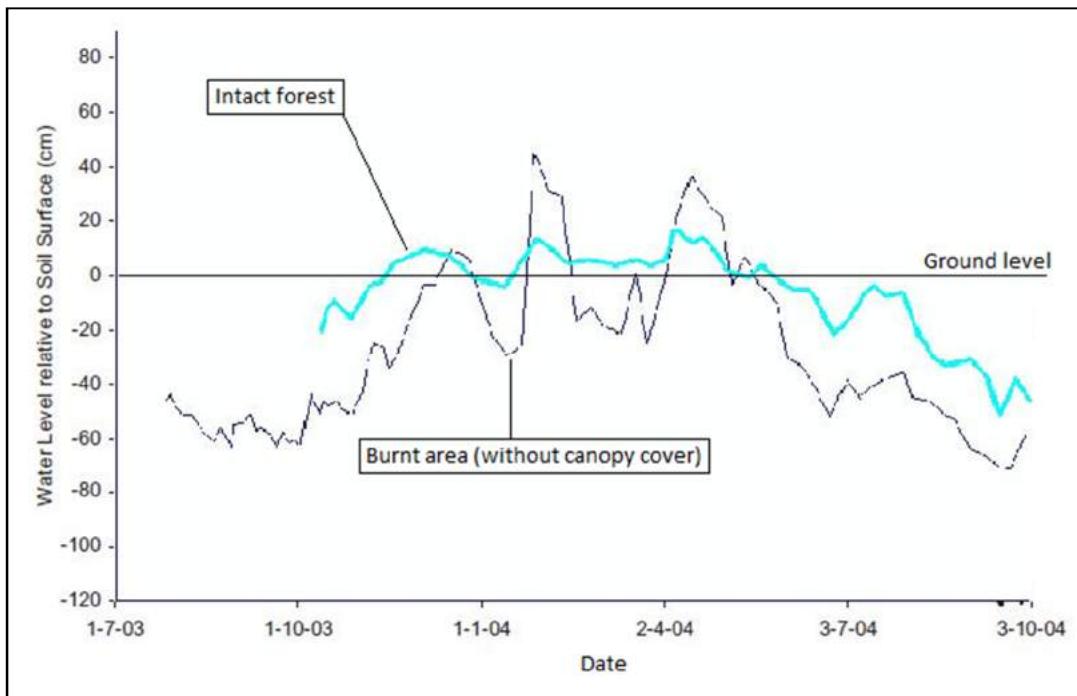


Gambar. 8. Dinamika muka air tanah Block A utara Eks. PLG Kalimantan Tengah (Rais, 2008)

ANCAMAN DAN DAMPAK

Pada kondisi alami hutan rawa gambut ditutupi oleh pohon-pohon yang membantu mempertahankan masukan bahan organik kedalam tanah gambut, sebagaimana telah disinggung sebelumnya. Tutupan kanopi pohon juga menghasilkan iklim mikro yang lembut di lantai hutan: melindungi permukaan tanah dari insolasi langsung, mempertahankan kelembaban dan menurunkan temperatur, mengurangi kecepatan angin dan laju evaporasi. Sehingga, dibawah kanopi hutan tanah gambut tetap lembab. Jika tutupan pohon ini dihilangkan maka hilang pula kesinambungan masukan bahan organik ke tanah gambut dan efek pelindung dari kanopi pohon, dalam kondisi demikian gambut berada dalam proses kepunahannya.

Suatu ilustrasi efek kanopi terhadap perilaku muka air tanah kembali dapat terlihat dari lahan gambut AHL. Gambar 9 memperlihatkan rekaman muka air tanah dari dua kondisi berbeda: tutupan hutan yang masih utuh dalam kawasan Taman Nasional Berbak (TNB) dan areal bekas terbakar dekat zona penyangga TNB dalam kawasan HPH Putra Duta Indah Wood. Muka air tanah dibawah hutan utuh terlihat lebih tinggi dan kurang berfluktuasi dibandingkan kawasan bekas terbakar. Lebih rendahnya muka air tanah di musim kemarau dalam kawasan bekas terbakar dapat disebabkan oleh laju evaporasi yang lebih tinggi, sebab laju keluaran melalui *groundwater flow* relatif sama pada kedua kawasan. Walaupun dampak kebakaran terhadap sifat-sifat fisik tanah pada areal bekas terbakar mungkin juga memainkan peranan penting sampai batas tertentu (mungkin melalui meningkatnya kenaikan kapiler), perubahan iklim mikro dapat dianggap sebagai penyebab utama perbedaan tersebut. Pengaruh tutupan kanopi yang serupa juga ditemukan oleh Anshari *et al* (2001) di Sentarum Kalimantan Barat. Selama musim kemarau yang sangat kering akibat El Nino 1997 sebagian besar danau-danau Sentarum kering, tetapi muka air tanah dibawah kanopi hutan rawa gambut tetap relatif tinggi.



Gambar 9. Muka air tanah hutan rawa gambut utuh dan bekas terbakar dalam tangkapan Air Hitam Laut, Jambi

Lebih lanjut, pada kondisi alami hampir keseluruhan kolom tanah gambut terendam dan mengalami efek pengapungan oleh tekanan air pori yang membantu mempertahankan permukaan lahan pada elevasi yang relatif stabil. Kondisi terendam juga menciptakan kondisi anaerobik, sehingga laju dekomposisi berada pada taraf minimal. Kondisi terendam juga mempertahankan kelembaban tinggi pada permukaan gambut dan menciptakan resistensi terhadap kebakaran. Bila direklamasi, drainase meningkatkan laju oksidasi gambut dan menimbulkan subsidensi, diikuti oleh periode banjir dan kekeringan parah bergantian dan berulang (Wösten *et al.*, 1997). Sekali drainase muka air tanah turun lebih dalam dari level alami sehingga kolom gambut yang terdahad pada kondisi aerobik meningkat, selanjutnya kondisi ini meningkatkan laju dekomposisi oleh mikroorganisme tanah, melepaskan karbondioksida ke atmosfir dan berkontribusi dalam emisi gas rumah kaca.

Menurunnya muka air tanah oleh drainase menyebabkan hilangnya efek pengapungan pada kolom tanah diatas level freatic. Perubahan kesetimbangan gaya berlanjut pada meningkatnya tegangan efektif yang mengakibatkan penurunan permukaan gambut atau subsidensi. Kolom gambut yang mengering diatas level freatic dapat meningkatkan hisapan matriks pada pori mikro dan mengakibatkan terjadinya pengertian pada tanah-tanah gambut bertekstur halus ditandai oleh

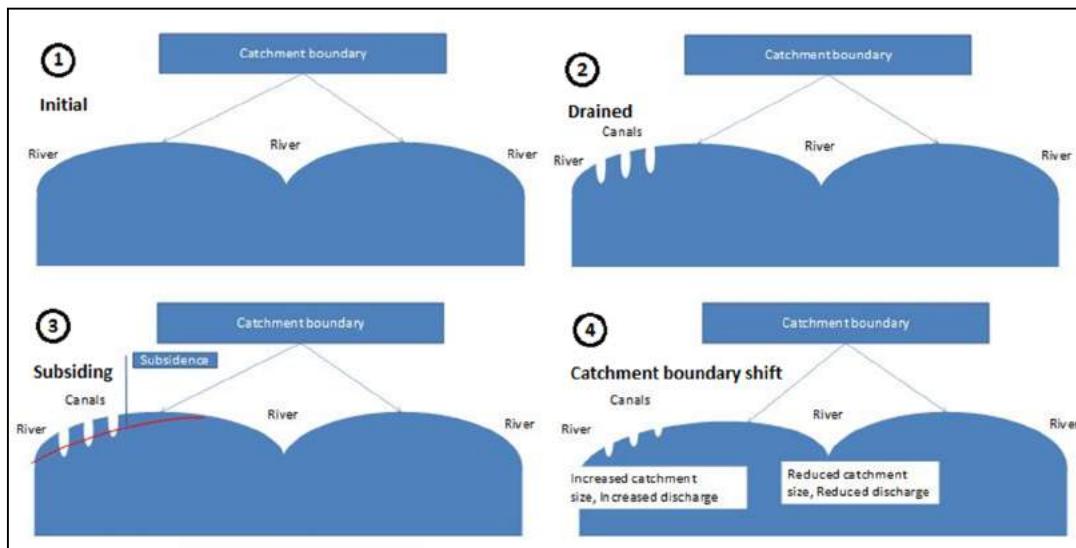
permukaan tanah yang mengeras, dan retakan-retakan di permukaan tanah. Pengeringan tanah gambut kadang-kadang dapat mencapai taraf pengeringan-tak-balik (*irreversible drying*) dimana gambut kehilangan sifat hidrofilik, menolak air dan tidak mampu lagi menyerapnya. Jika hal-hal ini terjadi maka lahan gambut tersebut bisa menjadi lahan terbuang.

Reklamasi gambut pantai juga dapat menimbulkan dampak lain yang khas. Beberapa lahan gambut dialasi oleh subsoil yang mengandung asam sulfat potensial, yang bila didrainase dapat berubah menjadi asam sulfat aktif yang sangat beracun tidak hanya bagi tanaman tetapi juga pada tubuh-tubuh air disekitarnya yang berhubungan (Maltby *et al.*, 1996).

Proyek Lahan Gambut Sejuta Hektar di Kalimantan Tengah semakin sering digunakan sebagai contoh ancaman dan dampak yang dapat terjadi di lahan gambut sebagaimana dibahas sebelumnya. Pemerintah Indonesia meluncurkan proyek ini di tahun 1996 dengan luas mendekati 1.8 juta hektar. Proyek ini menghilangkan tutupan hutan dari lahan gambut hampir seluruhnya (kecuali blok E yang relatif utuh dan beberapa kelompok terpencar di blok-blok lain) dan menggali jaringan kanal drainase dengan total panjang sekitar 4470 km. Sebagian besar kanal ini memiliki dalam 4 meter dan lebar 15 meter, beberapa diantaranya sedalam 10 meter dan lebar 30 meter. Sayangnya, sampai saat ini, jaringan drainase yang luas dan mahal ini sedikit sekali manfaatnya untuk pertanian, hanya mengeringkan lahan sampai pada tingkat yang membahayakan. Setahun setelah proyek ini berjalan, tahun kering El Nino 1997 membawa tekanan iklim yang keras terhadap neraca air kawasan tersebut. Defisit air yang berat menimbulkan kebakaran lahan gambut yang sangat luas dengan segala kerugian ekonomis dan ekologisnya.

Temuan dari lahan gambut Air Hitam Laut di Jambi oleh Wösten *et al* (2006) menunjukkan bahwa bila bagian hulu AHL direklamasi dapat menyebabkan mencuatnya luas tangkapan AHL sedangkan luas tangkapan Kumpeh (yang berbatasan dengannya) bertambah, baseflow AHL menurun sedangkan debit sungai Kumpeh naik, meningkatkan resiko banjir di sungai Kumpeh dan intrusi air laut di bagian hilir AHL. Topik-topik seperti ini sesungguhnya membutuhkan kajian jangka panjang agar dapat divalidasi secara meyakinkan. Namun karena belum ada kajian yang cukup panjang yang telah dilakukan di lahan gambut Indonesia, maka sebagian

besar kajian serupa menggunakan pendekatan modeling. Walaupun demikian, topik ini tetap berharga untuk dicatat dan pelajaran yang dapat ditarik pantas untuk dibawa dalam pembahasan kebijakan yang menyangkut masalah degradasi lahan gambut.



Gambar 10. Skema pergeseran batas tangkapan pada lahan gambut berkubah

EMISI KARBON

Proses dekomposisi gambut melepaskan karbon dioksida (CO_2) dan metana (CH_4) disamping berbagai gas lainnya serta asam-asam humat dan fulvat diantara berbagai senyawa tak-menguap lainnya. Asam-asam humat dan fulvat ikut menyebabkan rendahnya pH dan warna kehitaman atau kecoklatan pada gambut dan airnya. Zat-zat ini sangat resisten terhadap pelapukan lebih lanjut dan kontribusinya sangat kecil terhadap emisi karbon. Sementara itu emisi metana hanya terdeteksi pada gambut dalam kondisi jenuh air (Jauhianen *et al*, 2005) dan kuantitasnya sangat kecil dibandingkan emisi karbon dioksida. Inubushi *et al* (1998) menemukan bahwa laju emisi metana baik pada hutan rawa gambut maupun lahan gambut yang ditanami tanaman perkebunan adalah antara 96.4 - 120.9 kg/hektar/tahun, jauh lebih kecil dibandingkan laju emisi karbon dioksida; bahkan Melling *et al* (2005) menemukan angka yang lebih kecil lagi. Oleh karena laju emisi yang rendah ini maka pada lahan gambut tropis, metana dianggap gas rumah kaca yang kurang penting dibandingkan karbon dioksida.

Menurut Couwenberg *et al* (2009) proses oksidasi gambut meng-emisi-kan karbondioksida dengan laju 9 ton/hektar/tahun setiap 10 cm kedalaman drainase. Untuk kedalaman drainase lebih dari 50 cm laju emisi mendekati konstan pada angka 45 ton/hektar/tahun. Apabila temuan ini digunakan untuk menghitung emisi karbon dioksida pada lahan-lahan gambut yang direklamasi untuk perkebunan kelapa sawit dan akasia (dimana kedalaman drainase biasanya adalah 70 cm) kita peroleh angka taksiran emisi karbon dioksida sekitar 45 ton/hektar/tahun. Pada paragraf-paragraf berikut kita akan membandingkan angka ini dengan emisi karbon dioksida akibat kebakaran lahan gambut. Usup *et al* (2004) menyatakan bahwa penurunan muka air tanah 50 cm saja sudah menyebabkan lahan gambut cukup rentan terhadap kebakaran.

Pembakaran gambut melepaskan karbon ke atmosfir dengan laju jauh lebih tinggi dibandingkan oksidasi mikrobial, pada skala yang secara signifikan berkontribusi terhadap efek rumah kaca (Siegert *et al.*, 2001; Page *et al.*, 2002). Boehm *et al.* (2001) menyatakan bahwa pembakaran deposit gambut dapat mencapai kedalaman 100 cm. Temuan ini sesuai dengan hasil pengukuran penulis di lapangan dimana ketebalan pembakaran gambut terlihat bervariasi antara 10 cm – 100 cm, tergantung pada riwayat kebakaran. Kebakaran berulang cenderung menghasilkan parut bakar yang lebih dalam. Penulis mengkorelasikan hasil pengukuran ini dengan dataset AASTR - ESA fire atlas 1997 – 2009 untuk blok A, B, C, dan E di Kalimantan Tengah dan terlihat bahwa rata-rata ketebalan gambut yang hilang setiap kejadian kebakaran adalah 17 cm. Ketebalan pembakaran ini sebenarnya bervariasi, tergantung pada kedalaman muka air tanah pada saat itu. Sekitar 26 persen dari areal bekas kebakaran yang dikaji menunjukkan riwayat kebakaran berulang dengan kedalaman parut bakar antara 30 cm – 100 cm dengan rata-rata 60 cm. Areal kajian dengan riwayat kebakaran tunggal menunjukkan parut bakar lebih dangkal yaitu 10 cm – 30 cm, mayoritas dibawah 15 cm. Sedangkan areal dengan riwayat kebakaran berulang sebagian besar mengalami dua kali kebakaran, dengan rata-rata ketebalan pembakaran 30 cm setiap kejadian kebakaran. Kajian serupa juga dilakukan oleh Ballhorn *et al* (2009) dengan menggunakan teknik penginderaan jauh, yang menemukan bahwa rata-rata kedalaman parut bakar di lahan gambut Kalimantan

Tengah sekitar 33 cm, tetapi mereka tidak menyimpulkan kedalaman pembakaran setiap kejadian api.

Menggunakan temuan-temuan ini kita dapat menaksir besarnya emisi karbon dari kebakaran lahan gambut (dari substrat gambut saja) sekitar 253 ton/hektar setiap kebakaran, sedangkan emisi kumulatif dari areal dengan riwayat kebakaran berulang sekitar 893 ton/hektar. Angka-angka ini dihitung dengan mengasumsikan berat volum gambut 70 kg/m³ dan kandungan mass karbon 58%. Ballhorn *et al* (2009) menaksir bahwa 49.15 megaton karbon telah di-emisi-kan dari 256.8 ribu hektar lahan gambut yang terbakar selama El Nino 2006. Angka ini setara dengan emisi karbon dioksida 706.8 ton/hektar/tahun, atau kira-kira 16 kali lebih cepat dari laju emisi oleh oksidasi gambut yang didrainase dalam.

Berdasarkan paparan sebelumnya jelas bahwa kebakaran gambut melepaskan karbon dioksida jauh lebih cepat daripada oksidasi melalui dekomposisi mikrobial, dan menimbulkan ancaman sangat serius jika tidak dicegah. Sebagian besar kebakaran gambut di Indonesia bersifat antropogenik, walaupun kebakaran oleh penyebab alami mungkin juga terjadi. Adanya arang yang terkadang ditemukan dalam sampel-sampel tanah gambut pada lapisan dalam mengindikasikan hadirnya kebakaran di masa lalu selama proses perkembangan gambut di Indonesia; tetapi hal ini mungkin lebih berhubungan dengan kondisi iklim yang berbeda di masa lalu. Adapun pada saat ini yang lebih penting dicatat adalah kenyataan bahwa rendahnya curah hujan musim kemarau dan tingginya evapotranspirasi potensial, yang merupakan kondisi dimana sebagian besar lahan gambut Indonesia berada, membutuhkan perhatian serius untuk usaha pencegahan kebakaran yang lebih baik.

SUBSIDEN

Terjadinya subsiden gambut jika didrainase disebabkan oleh (a) oksidasi dan (b) densifikasi (kompaksi, desikasi, dan kehilangan gaya apung air pori). Pada iklim hangat, seperti Indonesia, pada jangka panjang sebagian besar subsiden disebabkan oleh oksidasi biokimia. Jika subsiden diplot menurut waktu diperoleh kurva eksponensial dengan slope negatif. Ini berarti laju subsiden lebih tinggi pada tahap-tahap awal drainase dan menurun menurut waktu secara asimtotik. Pada tahap-tahap awal drainase, dalam beberapa tahun pertama, densifikasi memberikan kontribusi

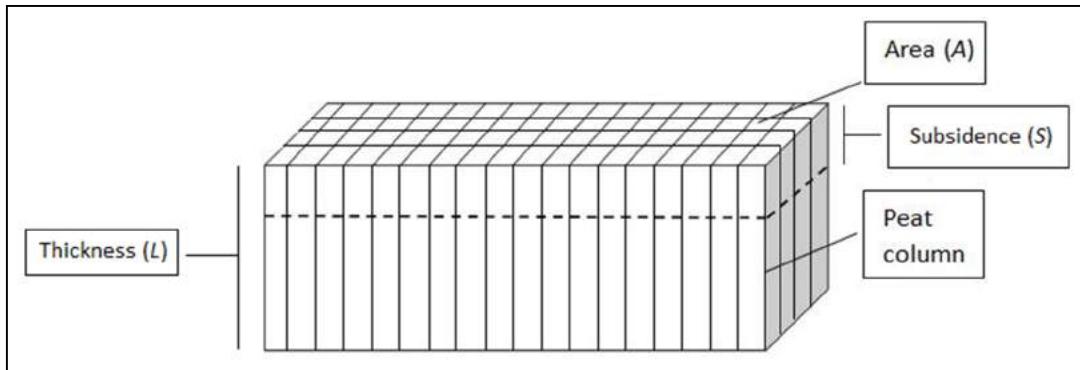
paling besar. Semakin lama berlanjut oksidasi dapat akhirnya menjadi kontributor tunggal, khususnya setelah kesetimbangan mekanik sistem mencapai titik dimana kepadatan tanah telah maksimum untuk kondisi yang ada. Kontribusi oksidasi terhadap subsiden, khususnya dinamika menurut waktu, masih kurang begitu dipahami. Kontribusi jangka panjangnya saat ini diperkirakan sekitar 40% - 60%, sepanjang gambut itu sendiri belum habis seluruhnya.

Faktor utama yang menentukan laju subsiden tanah gambut adalah iklim dan tata air. Faktor-faktor lain seyogyanya juga memainkan peranan, namun dalam konteks artikel ini, kedua faktor ini lebih patut diperhatikan dan secara logis paling berpengaruh. Menurut hukum Arrhenius reaksi (bio)kimia meningkat menurut temperatur. Oleh karena itu pada temperatur lebih tinggi di daerah tropis laju oksidasi biokimia gambut juga tinggi. Stephens dan Stewart (tanpa tahun) menduga bahwa laju reaksi biokimia dalam tanah gambut menjadi dua kali lipat setiap kenaikan temperatur 10°C , dengan demikian laju subsidensi gambut tropis kira-kira dua kali lipat gambut-gambut di daerah iklim sedang, setidak-tidaknya pada bagian oksidasi dari subsiden. Ini kelihatannya juga berlaku terhadap perbedaan temperatur akibat perbedaan tutupan kanopi.

Temperatur tanah gambut tanpa vegetasi kemungkinan besar lebih tinggi dibandingkan tanah gambut dibawah kanopi, setidak-tidaknya pada beberapa sentimeter teratas. Distribusi temporal periode kering dan curah hujan juga dianggap merupakan faktor iklim yang menentukan laju subsiden tanah gambut. Lamanya defisit air, yang merupakan periode dimana laju subsiden paling tinggi, merupakan rentang waktu yang perlu mendapat perhatian dalam upaya konservasi/restorasi hidrologi lahan gambut. Tujuan utama dari upaya ini adalah mengurangi laju subsiden dan oksidasi gambut dengan cara menaikkan muka air tanah musim kemarau.

Upaya konservasi/restorasi hidrologi lahan gambut seyogyanya membutuhkan alat yang handal untuk mengevaluasi/memprediksi keberhasilan/kegagalan dalam mengatasi masalah subsiden-emisi. Salah satu alat yang dapat digunakan tergolong kedalam kategori kalkulasi tidak langsung yang disederhanakan yang juga dikenal sebagai proxy. Pendekatan-pendekatan proxy saat ini cenderung me-relasi-kan rata-rata muka air tanah tahunan dengan laju subsiden. Pendekatan ini dapat menghindari komplikasi yang berasal dari kompleksnya sistem yang berhubungan dengan

subsiden dan oksidasi tanah organik. Disamping itu, pengukuran muka air tanah juga sederhana dan tidak mahal. Pendekatan ini telah digunakan antara lain oleh Stephens dan Stewart (tanpa tahun), Hooijer *et al* (2006), Wösten *et al* (2006), Rais (2008), Couwenberg *et al* (2009).



Gambar 11. Diskritisasi tubuh gambut kedalam kolom-kolom dengan luas horizontal A dan ketebalan L .

Suatu fakta menarik dari subsiden adalah bahwa proses ini tidak dapat dibuktikan langsung melalui indra manusia karena prosesnya sangat lambat. Bukti yang paling dapat diandalkan adalah hasil pengukuran jangka panjang yang rentangnya mencapai puluhan sampai ratusan tahun. Menggunakan kurva waktu ini kita dapat memahami bagaimana perilaku subsiden menurut waktu, dan kadang-kadang sangat berguna jika juga dihubungkan dengan variabel lain. Untuk tujuan prediksi, kita membutuhkan lebih dari sekedar kurva waktu, disini proxy memperoleh tempat kegunaannya. Dalam artikel ini dipaparkan suatu usulan model subsiden. Model ini menggunakan variabel kehilangan massa dan berat volum sesaat (*apparent bulk density*) dan dikemas dalam pola perhitungan bertahap (*stepwise*).

Prinsip utama dari model ini disarikan dari kurva waktu subsiden. Subsiden tersusun oleh dua komponen seperti telah disinggung diatas. Pada tahap-tahap awal densifikasi memainkan peranan paling besar dan dengan berlanjutnya waktu kehilangan massa akibat oksidasi akhirnya menjadi faktor tunggal yang menentukan laju proses. Densifikasi ditentukan oleh *apparent bulk density* dan parameter *bulk density threshold*. *Bulk density threshold* adalah angka maksimum yang dapat dicapai dalam kondisi tata air yang ada, dan merupakan suatu angka unik untuk setiap tata air tertentu. Disini diasumsikan bahwa semakin rendah *apparent bulk density* akan semakin tinggi densifikasi yang dapat dicapai, yang merupakan prinsip dalam

mekanika tanah. Dengan prinsip ini dapat diformulasikan sebuah persamaan subsiden seperti pada persamaan 1. Penggunaan rasio *bulk density* pada persamaan 1 tersebut kira-kira dapat diperbandingkan dengan konsep *relative density* pada mekanika tanah. Suku pertama ruas kanan persamaan 1, dimana rasio *bulk density* berada, menjelaskan bagian densifikasi dari subsiden, sedangkan suku kedua adalah bagian kehilangan massa (oksidasi).

$$\text{Persamaan. 1.} \quad S = b \times \left(\frac{BD_c}{BD} - 1 \right) + \Delta H_m$$

Dimana

- S : Subsiden pada waktu tertentu (L)
 BD_c : Ultimate Bulk Density untuk kondisi tata air (atau pada faktor-faktor subsiden) tertentu, suatu konstanta unik untuk masing-masing kondisi (ML^{-3})
 BD : Apparent Bulk Density (ML^{-3})
 b : Faktor subsiden yang menentukan laju awal dan kecuraman kurva subsiden (L); merupakan fungsi kedalam muka air tanah, sehingga dapat juga dinyatakan sebagai fungsi linier $b = \beta \times D$ dimana D adalah kedalam muka air tanah
 ΔH_m : Subsiden ekivalen akibat kehilangan massa melalui oksidasi gambut (L)

Terlihat jelas dari persamaan 1 bahwa pada saat BD mencapai BD_c maka suku pertama ruas kanan konvergen menuju nol sehingga subsiden sepenuhnya ditentukan oleh suku kedua. Pada saat ini kurva subsiden mencapai laju (di-idealkan) konstan, kompaksi/konsolidasi berhenti. Sistem ini dapat disederhanakan menjadi bentuk diskrit, secara spasial dan temporal, dengan merepresentasikan tubuh gambut tiga dimensi kedalam susunan kolom-kolom diskrit dengan luas A dan ketebalan L (Gambar 11). Dengan diskritisasi dalam ruang dan waktu ini, pada setiap kolom, kita dapat menyatakan BD sebagai BD_i ; M sebagai M_i dan L sebagai L_i dimana subscript i adalah penunjuk langkah waktu (time-step index). Kemudian kita memperoleh persamaan untuk apparent bulk density:

$$\text{Persamaan. 2.} \quad BD_i = \frac{M_{i-1} - \Delta M_{i-1}}{[(L)_{i-1} - \Delta L] \times A}$$

Dimana

- M : Massa gambut pada suatu kolom diskrit (M)
 ΔM : Kehilangan massa akibat oksidasi dalam suatu kolom diskrit (M)
 L : Ketebalan suatu kolom diskrit (L)
 ΔL : Kehilangan ketebalan pada suatu kolom akibat subsiden (L)
 A : Luas horizontal suatu kolom (L^2)

Demikian juga kita dapat menyatakan ΔH_m sebagai:

$$\text{Persamaan. 3.1.} \quad \Delta H_{m_{i-1}} = \frac{\Delta M_{i-1}}{BD_{i-1} \times A}$$

$$\text{Persamaan. 3.2.} \quad \Delta H_{m_{i-1}} = \frac{\Delta M_{i-1}}{BD_{i-1} \times A \times C_c}$$

Dimana C_c adalah kandungan massa karbon. Persamaan 3.1 digunakan bila kehilangan massa dinyatakan dalam kuantitas massa hilang dari gambut, sedangkan persamaan 3.2 digunakan bila massa hilang dinyatakan dalam kehilangan karbon. Akhirnya dengan mensubstitusikan persamaan 3 kedalam persamaan 1 kita peroleh:

$$\text{Persamaan. 4.} \quad S_i = b \times \left(\frac{BD_c}{BD_{i-1}} - 1 \right) + \frac{\Delta M_{i-1}}{BD_{i-1} \times A}$$

Dengan menggunakan persamaan 4 dan melakukan pencocokan kurva (fitting) pada beberapa tahun pertama rekaman subsiden untuk mengestimasi konstanta b , proses subsiden dapat disimulasikan secara bertahap, dengan demikian merupakan suatu model dinamis. Diskritisasi spasial memungkinkan ditanganinya keragaman spasial berbagai faktor yang terlibat, dengan demikian juga merupakan suatu model terdistribusi. Angka perkiraan untuk BD_c dapat dicontohkan secara langsung dari areal-areal yang telah mengalami proses densifikasi berlanjut seperti lahan-lahan perkebunan sawit (dengan drainase 60 cm – 70 cm di Indonesia). Sepanjang pengetahuan penulis angka-angka dalam kisaran 110 kg/m³ – 130 kg/m³ sering didapat dari lahan-lahan seperti itu. Estimasi untuk apparent bulk density awal dapat diwakili oleh nilai yang mungkin untuk hutan rawa gambut, biasanya berkisar 70 kg/m³ – 100 kg/m³; atau berdasarkan hasil pengukuran langsung dari lokasi yang dikehendaki.

Data kehilangan massa gambut akibat oksidasi dapat diperoleh dari hasil pengukuran langsung, tapi cara yang paling sederhana dan mudah adalah menggunakan relasi antara variabel hidrologis dengan kehilangan massa, sebagai contoh relasi muka air tanah terhadap emisi karbon (Couwenberg *et al*, 2009). Menghubungkan variabel-variabel hidrologis secara kompleks dengan oksidasi gambut dalam suatu simulasi membutuhkan sumberdaya dan waktu komputasi yang lama dan rentan terhadap pengaruh ketidakpastian. Hidrologi lahan gambut secara

intrinsik merupakan proses yang sangat dinamis, yang seringkali butuh batasan parameter waktu berskala harian, sementara subsiden adalah proses jangka panjang yang lebih sering diukur dan terlihat pengaruhnya dalam basis tahunan. Oleh karena itu memilih variabel hidrologis yang paling sederhana dan mudah diukur tetapi memiliki hubungan yang signifikan dengan oksidasi dan subsiden adalah cara yang paling realistik dalam menggunakan persamaan 4. Sebagaimana telah diperlihatkan oleh Couwenberg *et al* (2009), Eggelsmann (tanpa tahun) dan beberapa pengarang lainnya, muka air tanah (sering juga disebut drainase) mungkin merupakan variabel hidrologis yang paling sederhana untuk digunakan dalam sebuah persamaan proxy subsiden.

DAFTAR PUSTAKA

- Aldrian, E. and R. D. Susanto. 2003. Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *International Journal Of Climatology* 23: 1435–1452 (2003).
- Anderson, J. A. R. 1964. The structure and development of the peat swamps of Sarawak and Brunei. *Journal of Tropical Geography* 18 (1964): 7-16.
- Andriesse, J.P. 1988. Nature and Management of Tropical Peat Soils. *FAO Soils Bulletin* 59, Rome.
- Anshari, G., A.P. Kershaw, and S. van der Kaars. 2001. A late Pleistocene and Holocene pollen and charcoal record from peat swamp forest, Lake Sentarum Wildlife Reserve, West Kalimantan, Indonesia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 171 (2001) 213-228.
- Ballhorn, U., F. Siegert, M. Mason, and S. Limin. 2009. Derivation of burn scar depths and estimation of carbon emissions with LIDAR in Indonesian peatlands. *PNAS* 2009: 1-6.
- Boehm, H. D. V., F. Siegert, J. O. Rieley, S. K. Page, J. Jauhainen, H. Vasander, and A. Jaya. 2001. Fire impacts and carbon release on tropical peatlands in Central Kalimantan, Indonesia. In *Proceedings of the 22nd Asian Conference on Remote Sensing*, 5-9 November 2001 Singapore.
- Brady, M. A. 1997. Effects of vegetation changes on organic matter dynamics in three coastal peat deposits in Sumatra, Indonesia, in: J. O. Rieley and S. E. Page (Eds) *Biodiversity and Sustainability of Tropical Peatlands*, pp. 113–134 (Cardigan: Samara Publications).
- Cameron, C. C., J. S. Esterle and C. A. Palmer. 1989. The geology, botany and chemistry of selected peat-forming environments from temperate and tropical latitudes. *International Journal of Coal Geology*, 12 (1989) 105-156.

- Couwenberg, J. R. Domman and H. Joosten. 2009. Greenhouse gas fluxes from tropical peatlands in south-east Asia. *Global Change Biology* (2009), doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02016.
- Domman, R., J. Couwenberg and H. Joosten. 2011. Development and carbon sequestration of tropical peat domes in south-east Asia: links to post-glacial sea-level changes and Holocene climate variability. *Quaternary Science Reviews* 30 (2011) 999-1010.
- Eggelsmann. R. F. (tanpa tahun). Subsidence of peatland caused by drainage, evaporation, and oxidation. Geological Survey of Lower Saxony - Soiltechnological Institute Bremen, FRG.
- Furukawa, H. 1994. Coastal wetlands of Indonesia. Kyoto University Press, Japan.
- Hooijer, A. 2005. Hydrology of tropical wetland forests: recent research results from Sarawak peat swamps, in: M. Bonell and L.A. Bruijnzeel (Eds.), *Forest, Water and People in the Humid Tropics*, Cambridge University Press, United Kingdom, pp. 447-461.
- Hooijer, A., M. Silvius, H. Wösten and S. Page. 2006. PEAT-CO₂, Assessment of CO₂ emissions from drained peatlands in SE Asia. Report R&D projects Q3943 / Q3684 / Q4142. 2006. Delft Hydraulics in cooperation with Wetlands International and Alterra - Wageningen University.
- Inubushi, K., A. Hadi, M. Okazaki and K. Yonebayashi. 1998. Effect of converting wetland forest to sago palm plantations on methane gas flux and organic carbon dynamics in tropical peat soil. *Hydrol. Process.* 12, 2073-2080 (1998).
- Jauhiainen, J., H. Takahashi, J. E. P. Heikkinen, P. J. Martikainen and H. Vasander. 2005. Carbon fluxes from a tropical peat swamp forest floor. *Global Change Biology* (2005) 11, 1788-1797.
- Maltby, E., P. Burbridge and A. Fraser. 1996. Peat and acid sulphate soils: a case study from Vietnam, in: E. Maltby, C.P. Immirzi and R.J. Safford (Eds.), *Tropical Lowland Peatlands of Southeast Asia*, Gland, Switzerland, IUCN, pp. 187-197.
- Melling, L., R. Hatano, K. J. Goh. 2005. Methane fluxes from three ecosystems in tropical peatland of Sarawak, Malaysia. *Soil Biology & Biochemistry* 37 (2005) 1445-1453.
- Page, S.E. and J.O. Rieley. 1998. Tropical Peatlands: A Review of Their Natural Resource Functions, with Particular Reference to Southeast Asia, *International Peat Journal*, 8, 95-106.
- Page, S.E., F. Siegert, J. O. Rieley, H. D. V. Boehm, A. Jaya and S. Limin. 2002. The Amount of Carbon Released from Peat and Forest Fires in Indonesia in 1997, *Nature*, 420, 61-65.
- RePPProT. 1990. A national overview from the regional physical planning programme for transmigration, UK Overseas Development Administration & Direktorat Bina Program (Jakarta, Indonesia: Ministry of Transmigration).
- Rais, D. S. 2008. Simulasi pengaruh penabatan terhadap hidrologi dan emisi karbon bawah permukaan pada lahan gambut Eks-PLG kabupaten Kuala Kapuas,

- Kalimantan Tengah. Laporan Teknis CKPP-Extension 2008. Wetlands International - Indonesia Programme.
- Rieley, J.O., S.E. Page, and B. Setiadi. 1996. Distribution of peatlands in Indonesia, in: E. Lappalainen (ed.), *Global Peat Resources*, Jyväskylä, Finland: International Peat Society, pp. 169–178.
- Ritzema, H. and H. Wösten .2002. Hydrology of borneo's peat swamps. STRAPEAT - Status Report Hydrology. April 2002
- Siderius, C. 2004. Modelling of Hydrological Processes of the Air Hitam Laut Watershed and the Impacts of Various Land Use Scenarios, Water for food & ecosystems programme on: Promoting the river basin and ecosystem approach for sustainable management of SE Asian lowland peat swamp forests. <http://www.waterfoodecosystems.nl>.
- Siegert, F., G. Ruecker, A. Hindrichs, and A.A. Hoffman. 2001. Increased Damage from Fires in Logged Forests During Droughts Caused by El Niño, *Nature*, 414,437–440.
- Silvius, M.J., H.W. Simons, and W.J.M. Verheugt. 1984. Soils, Vegetation, Fauna and Nature conservation of the Berbak Game Reserve, Sumatra, Indonesia. Research Institute for Nature Management, Arnhem, The Netherlands.
- Stephens, J. C. and E.H. Stewart. (tanpa tahun). Effect of climate on organic soil subsidence. Agricultural Research Service, U.S.D.A. Ft. Lauderdale, Florida.
- Takahashi, H. and Y. Yonetani. 1997. Studies on microclimate and hydrology of peat swamp forest in Central Kalimantan, Indonesia, in J.O. Rieley and S.E. Page (Eds.), *Biodiversity and Sustainability of Tropical Peatlands*, Samara Publications, Cardigan, United Kingdom, pp. 179–187.
- Usup, A., Hashimoto, Y., Takahashi, H. & Hayasaka, H. 2004. Combustion and thermal characteristics of peat fire in tropical peatland in Central Kalimantan, Indonesia, *Tropics*, 14, pp. 1–19.
- Wahyunto, Suparto, Bambang H., H. Bhekti. 2006. Sebaran Lahan Gambut, Luas dan Cadangan Karbon Bawah Permukaan di Papua. Wetlands International - Indonesia Programme.
- Wetlands International - Indonesia Programme. 2003. Peta luas sebaran lahan gambut dan kandungan karbon di pulau Sumatera 1990 - 2002.
- Wetlands International - Indonesia Programme. 2004. Peta sebaran lahan gambut, luas dan kandungan karbon di Kalimantan 2000 - 2002.
- Wösten, J. H. M., J. Van Den Berg, P. Van Eijk, G. J. M. Gevers, W. B. J. T. Giessen, A. Hooijer, A. Idris, P. H. Leenman, D. S. Rais, C. Siderius, M. J. Silvius, N. Suryadiputra and I. T. C. Wibisono. 2006. Interrelationships between Hydrology and Ecology in Fire Degraded Tropical Peat Swamp Forests. *Water Resources Development*, Vol. 22, No. 1, 157–174, March 2006.
- Wösten, J.H.M., A.B. Ismail, and A.L.M. Van Wijk. 1997. Peat Subsidence and Its Practical Implications: A Case Study in Malaysia, *Geoderma*, 78, 25–36.
- Wösten, J.H.M., A. Hooijer, C. Siderius, D. S. Rais, A. Idris and J. Rieley. 2006. Tropical Peatland water management modelling of the Air Hitam Laut catchment in Indonesia. *Intl. J. River Basin Management* Vol. 4, No. 4 (2006), pp. 233–244