

Dipa Satriadi Rais



Lahan Gambut dan *Drainability Limit*



Wetlands
INTERNATIONAL

Lahan Gambut dan *Drainability limit*

Penulis:

Dipa Satriadi Rais



Wetlands
INTERNATIONAL



PARTNERS FOR RESILIENCE

Bogor, Desember 2018



Lahan Gambut dan *Drainability limit*

© Wetlands International Indonesia, 2018

Penulis : Dipa Satriadi Rais

Desain & Layout : Triana

Foto Cover : © Wetlands International Indonesia

Saran Kutipan

Rais, D.S. 2018. Lahan gambut dan *drainability limit*. Wetlands International Indonesia. Bogor.



Kata Pengantar

Sebagai salah satu pemilik ekosistem gambut tropikal dunia, Indonesia memiliki kewajiban dalam melakukan perlindungan dan pengelolaan gambut yang berkelanjutan, mengingat fungsi dan peran ekosistem gambut yang sangat signifikan terhadap ketersediaan air tawar, keanekaragaman hayati dan mitigasi perubahan iklim. Sayangnya, praktek yang terjadi saat ini berbanding terbalik dengan kondisi ideal. Ekosistem gambut yang dinilai tidak produktif namun cukup aman jika ditinjau dari sisi penguasaan lahan (tenurial), telah menjadi sasaran empuk bagi pengembangan perkebunan monokultur dan hutan tanaman industri. Setidaknya empat dekade pengelolaan gambut berbasis drainase telah menyusutkan keberadaan ekosistem gambut yang sehat, akibatnya, berbagai ancaman bencana dan kerugian lainnya muncul.

Buku ini menjelaskan tentang konsep *Drainability Limit* (ambang drainase) yang saat ini mulai diperkenalkan kepada para stakeholder pengelola ekosistem gambut di Indonesia. Dengan memahami konsep *drainability limit*, diharapkan para stakeholder bisa memahami bahwa ada batasan tertentu dimana drainase gravitasi sudah tidak bisa dilakukan lagi. Sehingga terlewatnya batasan ini menandai dimulainya pengelolaan gambut yang berbiaya tinggi, dan pada saat yang bersamaan restorasi gambut pun sudah terlambat untuk dilakukan. Dengan memahami kondisi tersebut diharapkan para stakeholder bisa menghindari kerugian dan ancaman bencana yang lebih lanjut. Semoga buku ini bermanfaat dan mampu meningkatkan kesadaran para pihak untuk mengelola gambut secara berkelanjutan.

Bogor, Desember 2018

Hormat kami,

Wetlands International Indonesia

Ringkasan

Indonesia memiliki lahan gambut tropis terluas di dunia yang ditaksir sekitar 14,9 Juta hektar dan tersebar di tiga pulau yakni Sumatera (6,4 Juta hektar), Kalimantan (4,8 Juta hektar) dan Papua (3,7 juta hektar). Sayangnya, kerusakan lahan gambut di negeri ini terjadi sangat massive dalam beberapa dekade terakhir, utamanya di Sumatera dan Kalimantan. Pemicu utama kerusakan lahan gambut Indonesia adalah konversi lahan menjadi pertanian/perkebunan konvensional monokultur, lahan pemukiman atau sarana rural/urban lainnya yang merusak neraca air dan neraca karbon lahan gambut. Kerusakan neraca air terjadi karena bertambahnya keluaran air akibat drainase buatan dan berkurangnya kerapatan tajuk. Sedangkan kerusakan neraca karbon terjadi karena berkurangnya masukan karbon dari biomassa di atas permukaan tanah dan naiknya keluaran karbon akibat meningkatnya laju dekomposisi mikrobial dan/atau kebakaran substrat gambut. Perlu dicatat bahwa kerusakan neraca karbon dan neraca air saling berhubungan dan dapat saling memperparah kerusakan satu sama lain.

Salah satu dampak buruk kerusakan neraca air dan neraca karbon di lahan gambut adalah amblasan lahan atau disebut juga subsiden (Inggris: *subsidence*). Subsiden merupakan kejadian hampir kasat mata, tidak mudah terdeteksi dan bila terdeteksi seringkali diabaikan manusia; walaupun sesungguhnya bisa menimbulkan berbagai persoalan kronis jangka panjang seperti risiko penurunan nilai guna lahan, meningkatnya biaya penggunaan lahan, risiko kerusakan lingkungan, sosial dan ekonomi akibat banjir dan genangan, dan kehilangan wilayah kelola.

Untuk mencegah atau mengurangi subsiden di lahan gambut diperlukan pengelolaan lahan yang memiliki visi jangka panjang dan mengedepankan aspek kelestarian serta mempertimbangkan fakta-fakta sains. Visi jangka panjang diperlukan karena subsiden merupakan kejadian yang berkesinambungan yang dampaknya seringkali baru terasa setelah jangka waktu yang lama. Oleh sebab itu keputusan untuk suatu pengelolaan (alokasi ruang, opsi *land use*, durasi penggunaan) selayaknya tidak hanya didasarkan pada kepentingan/keadaan sekarang tetapi juga berdasarkan proyeksi kepentingan/kondisi di masa depan. Pengutamakan aspek kelestarian diperlukan karena pada akhirnya manusia sering dihadapkan pada konflik antara kepentingan lingkungan dan kemaslahatan jangka panjang versus kepentingan ekonomi sesaat atau jangka pendek.

Fakta-fakta sains utama yang perlu diperhatikan dalam pengelolaan lahan gambut untuk mencegah atau mengurangi subsiden dapat diringkaskan sebagai berikut:

1. Subsiden menyebabkan penurunan slope permukaan lahan. Jika slope permukaan lahan tidak cukup untuk menciptakan gradien hidrolis, air hujan yang turun di lahan tersebut tidak/kurang mampu mengatasi hambatan (*drag*) di permukaan lahan sehingga tidak/kurang mampu mengalir ke tempat yang lebih rendah. Akibatnya frekuensi dan kedalaman banjir meningkat;

2. Setelah lahan yang mengalami subsiden menjadi lebih rendah dari sekitarnya air akan cenderung mengumpul ke lokasi tersebut menyebabkan terjadinya genangan permanen;
3. Subsiden terjadi terus menerus menyebabkan permukaan lahan turun hingga mencapai posisi tertentu dimana subsiden tidak mungkin lagi berlangsung, atau berhenti karena terjadinya perubahan kondisi lingkungan, yaitu bila mengalami salah satu atau kedua kondisi berikut:
 - Neraca karbon tidak lagi negatif dan tidak ada *effective stress* yang bekerja pada kolom vertikal tanah. Hal ini bisa terjadi melalui intervensi manusia dengan restorasi hidrologi dan vegetatif;
 - Bila gradien hidrolik terlalu kecil dan tidak memungkinkan lagi terjadinya drainase gravitasi ke tubuh air alami terdekat. Bila kondisi ini tercapai, disebut tercapainya *drainability limit*.

Drainability limit merupakan kondisi batas *point-of-no-return* yang menandai dimulainya pemanfaatan lahan gambut biaya tinggi dan juga merupakan batas dimana pemulihan ekosistem lahan gambut tidak mungkin lagi berhasil. Oleh sebab itu *drainability limit* merupakan aspek teknis lahan gambut yang seyogyanya mendapat perhatian penting dan perlu dikaji.

Summary

Indonesia has the largest tropical peatland in the world which is estimated at around 14.9 million hectares and spread over three islands, namely Sumatra (6.4 million hectares), Kalimantan (4.8 million hectares) and Papua (3.7 million hectares). Unfortunately, the damage of peatlands in this country has been very massive in the last few decades, especially in Sumatra and Kalimantan. The main driver of damage to Indonesia's peatlands is the conversion of land into conventional monoculture agriculture / plantations, residential land or other rural / urban facilities that damage the water balance and peatland carbon balance. Damage to the water balance occurs due to increased water output due to artificial drainage and reduced canopy density. Whereas carbon balance damage occurs because of reduced carbon input from above ground biomass and increased carbon output due to increased microbial decomposition rates and / or peat substrate fires. It should be noted that damage to the carbon balance and water balance are interconnected and can exacerbate each other's.

One of the adverse effects of damage to the water balance and carbon balance on peatlands is land subsidence. Subsidence is almost invisible event, not easily detected and if detected are often ignored by humans; although in fact it can cause a variety of long-term chronic problems such as the risk of decreasing land use value, increasing land use costs, environmental, social and economic damage due to flooding and inundation, and loss of areas.

To prevent or reduce subsidence on peatland, land use management (in peatlands) should has a long-term vision and prioritizes aspects of sustainability and considers the facts of science. A long-term vision is needed because subsidence is a continuous event whose impact often only feels after a long period of time. Therefore the decision for a management (space allocation, land use option, duration of use) should not only be based on current interests / conditions but also based on projections of future interests / conditions. Prioritizing aspects of sustainability is needed because ultimately humans are often faced with conflicts between the interests of the environment and long-term benefits versus short-term or short-term economic interests.

The main scientific facts that need to be considered in managing peatlands to prevent or reduce subsidence can be summarized as follows:

- 1. The subsidence causes a decrease in land surface slope. If the land surface slope is not enough to create a hydraulic gradient, the rainwater that falls on the land is not / less able to overcome drag on the land surface, so that, it is not / less able to flow to a lower place. As a result the frequency and depth of the flood increases;*
- 2. After the land experiencing subsidence, it becomes lower than the surrounding water, the, then the water will tend to collect to that location causing permanent inundation;*

3. *Subsidence occur continuously causing the land surface to fall to a certain position where subsidence may no longer take place, or stop due to changes in environmental conditions, when experiencing one or both of the following conditions:*

- *The carbon balance is no longer negative and there is no effective stress that works on the vertical column of land. This can occur through human intervention with hydrological and vegetation restoration;*
- *If the hydraulic gradient is too small and does not allow gravity to drain to the nearest natural water body. In the other word, this condition has reached drainability limit.*

Drainability limit is a point-of-no-return boundary condition that marks the start of high-cost peat land management and it is also a boundary where the restoration of peatland ecosystems is no longer successful. Therefore drainage limit is a technical aspect of peatland which should receive important attention and need to be assessed.

Daftar Isi

Kata Pengantar	iii
Ringkasan	iv
Summary	vi
Daftar Isi	viii
Daftar Tabel	x
Daftar Gambar	x
Daftar Istilah	xiii
1. Apa itu gambut?	1
Tanah gambut	1
Lahan gambut	2
Ekosistem gambut	2
Hutan rawa gambut	3
2. Bagaimana gambut terbentuk?	4
Model pembentukan gambut tropis Anderson	4
Model pembentukan gambut tropis Furukawa	7
Kombinasi model Anderson dan Furukawa	8
3. Bagaimana kondisi alami gambut?	9
Neraca karbon	9
Neraca air	10
Proses-proses unik di ekosistem hutan rawa gambut	11
4. Apa yang terjadi jika hutan rawa gambut dikonversi untuk kegunaan lain?	12
Rusaknya dua neraca penting HRG	12
Apa itu subsidi?	13
Konsolidasi	14

Kompaksi.....	15
Shrinkage	15
Oksidasi.....	17
Ringkasan subsiden	19
5. Apa yang dimaksud dengan drainability limit?.....	20
Lingkaran setan drainase.....	20
Drainability limit	22
6. Untuk apa kajian drainability limit dan bagaimana melakukannya?	25
Kegunaan kajian drainability limit.....	25
Metode kajian drainability limit.....	26
Pemetaan <i>drainage base</i>	26
Pemetaan <i>drainage limit time</i>	32
Penggunaan hasil kajian <i>drainability limit</i> dalam perencanaan dan pengambilan keputusan	35
7. Siapa yang seharusnya melakukan kajian drainability limit?	36
Referensi	38

Daftar Tabel

Tabel 1.	Faktor emisi (EF) untuk GRK CO ₂ pada beberapa <i>land use</i> , dikutip dari IPCC 2013	18
Tabel 2.	Ringkasan hasil analisis sinusitas sungai ilustrasi yang diberikan pada gambar 19	28

Daftar Gambar

Gambar 1.	Contoh ekosistem gambut di wilayah subtropis dan lintang tinggi: Bog (kiri) dan Fen (kanan)	3
Gambar 2.	Contoh ekosistem hutan rawa gambut. Dalam gambar diatas diperlihatkan salah satu komponen unik dalam sistem HRG yaitu sistem sungai air hitam (<i>blackwater stream</i>).....	3
Gambar 3.	Kondisi yang memungkinkan pembentukan gambut model Anderson: keberadaan delta atau teluk dengan proses deposisi di zona pasang surut (kiri). Proses deposisi dan regresi air laut memungkinkan berkembangnya area tidal flat dan majunya garis pantai (kanan).....	5
Gambar 4.	Fase 1 model pembentukan gambut Anderson: Mangrove (area hijau muda) mengkoloni area pasang surut delta atau teluk. Garis pantai maju ke arah laut, rawa bagian belakang perlahan berubah dari kondisi payau ke tawar. Gambut tipis terakumulasi di rawa air tawar (hijau tua).....	5
Gambar 5.	Fase 2 model pembentukan gambut Anderson: Garis pantai dan koloni mangrove (area hijau muda) semakin maju ke arah laut. Rawa air tawar paling belakang semakin terpisah dari laut. Tanggul sungai terbentuk dan semakin tinggi. Laju akumulasi gambut semakin cepat.....	6
Gambar 6.	Fase 3 model pembentukan gambut Anderson: Dengan terbentuk dan bertambah tingginya tanggul-tanggul sungai (atas) maka frekuensi, kedalaman, dan durasi kondisi saturasi semakin meningkat yang diikuti oleh kenaikan laju akumulasi bahan organik, sehingga aukuran kubah gambut bertambah (tengah). Dengan semakin tingginya puncak kubah gambut akan tercapai batas dimana kubah air tidak mampu lagi mengikuti pertumbuhan kubah gambut. Akibatnya laju akumulasi bahan organik di puncak kubah jadi berkurang (karena berkurangnya kondisi saturasi di permukaan tanah) dibandingkan yang terjadi di kaki kubah, sehingga terjadi pendataran puncak kubah (bawah)	6

Gambar 7.	Model pembentukan gambut Furukawa. Atas: Bentang alam pada epik Pleistosen memperlihatkan Paparan Sunda sebagai dataran rendah. Tengah: Kenaikan air laut Holosen menciptakan zona litoral tempat deposisi liat marin, liat pasang surut dan liat payau. Sementara pluvialisasi iklim menciptakan rawa-rawa air tawar di teras pleistosen. Bawah: Akumulasi bahan organik di teras pleistosen membentuk gambut teras. Regresi air laut holosen disertai dengan deposisi organik di zona litoral membentuk gambut recent lagoon dan <i>very recent tidal flat</i> . Diadaptasi dari Furukawa (1994).....	8
Gambar 8.	Segitiga hutan rawa gambut.....	9
Gambar 9.	Contoh <i>Soil Shrinkage Curve</i> : hubungan antara <i>void ratio</i> (<i>e</i>) dengan <i>moisture ratio</i> (<i>v</i>)	16
Gambar 10.	Profil distribusi vertikal <i>bulk density</i> pada lahan yang didrainase yang memperlihatkan <i>bulk density</i> semakin tinggi di dekat permukaan tanah. Sumber: Vernimmen <i>et al.</i> (2014).....	17
Gambar 11.	Ilustrasi subsiden pada lahan yang didrainase tanpa dilakukan <i>dredging</i> berkala: permukaan lahan turun dengan berlanjutnya waktu sementara muka air tanah relatif tetap. Muka air tanah berangsur-angsur menjadi dangkal dan laju subsiden berangsur-angsur berkurang.....	20
Gambar 12.	Ilustrasi subsiden pada lahan yang didrainase dengan menerapkan <i>dredging</i> berkala: Permukaan lahan turun dengan berlalunya waktu, tetapi muka air tanah juga diperdalam secara berkala. Muka air tanah dipertahankan relatif tetap dalam jangka panjang, subsiden tidak dapat berhenti.....	21
Gambar 13.	Laju subsiden tipikal di lahan gambut yang didrainase dengan dan tanpa <i>dredging</i> berkala.	21
Gambar 14.	Permukaan lahan dan muka air tanah tipikal di lahan gambut yang didrainase dengan dan tanpa <i>dredging</i> berkala.	21
Gambar 15.	Ilustrasi <i>drainability limit</i> : Muka air tanah (garis biru utuh) dan <i>drainage base</i> (garis biru putus-putus). Elevasi permukaan lahan turun secara sinambung dan akhirnya muka air tanah menjadi menjadi dekat ke <i>drainage base</i>	22
Gambar 16.	Sebuah polder di Jijmegen, Belanda. Perhatikan air sungai (di sebelah kiri) yang lebih tinggi dari permukaan lahan (kanan). Tanggul-tanggul besar harus dibangun di sekeliling polder (sekali-gus berfungsi sebagai jalan dalam gambar diatas) dan harus dirawat secara rutin. Jika terjadi kegagalan tanggul, air sungai dari kiri akan membanjiri polder di kanan.	24

Gambar 17. Ilustrasi hilangnya daratan karena tergenang saat <i>drainage limit</i> terlewati. Warna kuning dan orange pada gambar kiri menunjukkan lapisan gambut. Warna biru pada gambar kanan menunjukkan gambut telah mengalami subsiden dan tergenang permanen.....	24
Gambar 18. Ilustrasi posisi sungai air hitam terhadap sungai deposisi: sungai air hitam berada posisi lebih tinggi daripada sungai deposisi yang menjadi sungai utamanya.	26
Gambar 19. Ilustrasi cara penghitungan sinusitas sungai pada tiga segmen: A (cyan), B (merah) dan C (kuning). Panjang sungai diperlihatkan oleh garis berliku, panjang lembah diperlihatkan oleh garis lurus. Hasil analisis sinusitas diberikan pada Tabel 2.	28
Gambar 20. Contoh pembagian tubuh air acuan kedalam segmen yang berbeda berdasarkan lereng saluran. Warna berbeda menunjukkan lereng yang berbeda (kanan). Semua segmen kemudian dipartisi dan diwakili oleh node berjarak 100 meter, diperlihatkan sebagian sebagai inlet (kiri)	29
Gambar 21. Ilustrasi penempatan titik-titik perwakilan secara acak (titik merah) diantara sungai-sungai acuan (garis biru). Salah satu minimum <i>bounding geometry</i> (MBG) pertetanggan titik perwakilan diperlihatkan sebagai segitiga merah. Area kajian berada diantara garis biru dan garis kuning. Rata-rata luas MBG kurang dari 10% luas area kajian. Contoh jarak titik ke tubuh air acuan terdekat diperlihatkan dalam garis hitam.....	31
Gambar 22. Posisi relatif <i>drainage base</i> terhadap <i>basal contact</i> gambut: <i>drainage base</i> berada diatas <i>basal contact</i> (kiri), dibawah (tengah) dan sejajar (kanan).	32

Daftar Istilah

- Aktinomisetes** : Aktinomisetes adalah salah satu kelas bakteri yang banyak ditemukan di dalam tanah, memiliki morfologi mirip jamur berfilamen dengan adanya struktur miselia dan pembentukan konidia pada cabang-cabang aerial. Struktur dan komposisi kimiawi sel aktinomisetes lebih mirip bakteri daripada jamur. Ciri-ciri utama aktinomisetes antara lain: umumnya memiliki fase vegetatif dengan pembentukan filamen bercabang, organisasi sel bersifat prokaryotik, umumnya non-motil (tidak memiliki alat gerak), bersifat gram-positif, ber-reproduksi secara aseksual dengan sebagian besar membentuk konidia, tidak memiliki endosperma, dan merupakan organisme kemo-organotrof sehingga menempati relung saprofit dan berperan vital dalam proses penguraian bahan organik.
- Aquifer** : Bagian dari litosfir (bagian atas kerak bumi) yang memiliki rongga atau pori dan mampu menyimpan atau melewatkan air dalam jumlah signifikan.
- Basal contact** : Bidang batas pertemuan antara dua lapisan geologi pada bagian bawah lapisan tersebut.
- Bulk Density (kerapatan lindak)** : Disebut juga dengan istilah bobot isi menunjukkan perbandingan antara berat tanah kering dengan volume tanah termasuk volume pori-pori tanah.
- Dekomposisi microbial** : Proses penguraian bahan organik oleh mikroorganisme.
- Densik** : Lapisan atau horizon tanah spodik (akumulasi *iluvial* bahan organik dengan atau tanpa oksida besi) yang mengeras dan tersemen (*cemented*).
- Deposisi** : Proses geologi dimana batuan, tanah dan bahan-bahan sedimen lainnya diendapkan oleh air, udara, angin dan gravitasi sehingga membentuk landform (bentang lahan) atau landmass (paparan benua).
- Deposit aluvial delta dan teluk** : Hasil proses deposisi sungai di delta dan teluk.
- Detritus** : Bahan organik mati berbentuk partikulat (tidak dalam bentuk larut).

- Drainase : Pembuangan massa air dari permukaan atau bawah permukaan dari suatu tempat.
- Drainability limit* : Kondisi batas dimana drainase tidak mungkin lagi terjadi. Limit ini terdiri atas limit posisi (dalam ruang tiga dimensi) dan limit waktu. Limit posisi dimana drainase tidak memungkinkan lagi disebut dengan *drainage base*. Limit waktu dicapainya *drainage limit* disebut *drainage limit time* yaitu rentang waktu yang diperlukan lahan mengalami subsiden dari suatu elevasi ke *drainage base*.
- Duripan : Horizon diagnostik dalam taksonomi tanah yang dicirikan oleh silika *iluvial* yang tersemem (*cemented*) ke lapisan hardpan. Dalam sistem pemetaan dan klasifikasi tanah duripan sering disimbolkan dengan Bqm.
- Evapotranspirasi : Penguapan air dari permukaan tanah dan transpirasi tumbuhan.
- Gelic Materials : Bahan-bahan yang mengalami permafrost pada 200 cm teratas tubuh tanah.
- Gradien Hidrolik : Gradien hidrolik adalah gradient atau lereng berupa nisbah antara beda-energi di antara dua titik pada suatu tubuh air terhadap jarak antara kedua titik tersebut. Energi ini dapat dinyatakan dalam ekuivalen tekanan atau kedalaman kolom air. Pada sistem muka air bebas atau akuifer tak tertekan gradien muka air dapat mencerminkan gradien hidrolik secara langsung. Pada sistem akuifer tertekan gradien muka air tidak mencerminkan gradien hidrolik.
- Insolasi : Insolasi adalah alih bahasa dari istilah *insolation* dalam bahasa inggris yang pada awalnya merupakan singkatan dari *incoming solar radiation*. Insolasi adalah besaran yang menunjukkan tingkat keterpaparan suatu permukaan terhadap radiasi matahari dinyatakan dalam satuan energi (joule) per satuan luas area (m^2) per satuan waktu (detik).
- Kompaksi : Bentuk subsiden tanpa kehilangan massa, seringkali merupakan perubahan volume tak balik, merupakan proses yang bekerja melalui gaya luar, dapat berupa beban (*load*) pada permukaan gambut, atau vibrasi yang merambat melalui matriks gambut yang menyusun-ulang dan mempersempit jarak antar partikel-partikel gambut, yang selanjutnya diperkuat oleh gaya-gaya kohesi, adhesi, dan tegangan matriks. Kompaksi terbatas pada lokasi-lokasi yang mengalami beban atau rekayasa, seperti area jalan, bangunan, timbunan tanah dan sebagainya.

- Konsolidasi : Konsolidasi sering juga disebut kompresi atau *compression*, merupakan bentuk subsiden tanpa kehilangan massa yang terjadi akibat meningkatnya *effective stress* (tekanan vertikal bersih) yang bekerja pada tubauh tanah. Penurunan muka air tanah menyebabkan berkurangnya gaya apung oleh air sehingga beban massa tanah sendiri menambah tekanan bersih vertikal.
- Kontak Lithik : Pertemuan atau perbatasan antara lapisan tanah dengan lapisan batuan dibawahnya yang tidak terlapuk.
- Kontak paralithik : Pertemuan atau perbatasan antara lapisan tanah dengan lapisan batuan dibawahnya yang terlapuk.
- Neraca Air : Neraca atau pembukuan yang menunjukkan komponen-komponen masukan, keluaran dan simpanan serta kuantitas air pada setiap komponen tersebut dalam suatu ruang fisik dengan batas-batas yang jelas dan dalam kurun waktu yang jelas pula. Neraca air tak ubah seperti neraca keuangan suatu entitas yang jelas yang membukukan setiap uang masuk, keluar dan tabungan dalam rentang waktu yang jelas pula.
- Neraca karbon : Neraca atau pembukuan yang menunjukkan komponen-komponen masukan, keluaran dan simpanan serta kuantitas karbon pada setiap komponen tersebut dalam suatu ruang fisik dengan batas-batas yang jelas dan dalam kurun waktu yang jelas pula. Neraca karbon tak ubah seperti neraca keuangan suatu entitas yang jelas yang membukukan setiap uang masuk, keluar dan tabungan dalam rentang waktu yang jelas pula.
- Oksidasi : Reaksi kimia atau biokimia dimana suatu unsur atau senyawa membentuk ikatan dengan oksigen, atau kehilangan hidrogen, atau mengalami kehilangan elektron. Oksidasi bahan organik meyebabkan terpecahnya rantai karbon yang berubah sifat menjadi volatile (berubah menjadi gas) atau soluble (larut dan mudah hilang terbawa air). Oleh sebab itu oksidasi substrat gambut menyebabkan kehilangan massa tanah dan memicu subsiden.
- Perhumid : Sangat lembab.
- Permafrost : Lapisan atas kerak bumi baik berupa batuan, tanah, es atau bahan organik yang mengalami suhu dibawah titik beku ($<0^{\circ}\text{C}$) selama minimal dua tahun berturut-turut.
- Pluvialisasi iklim : perubahan iklim yang ditandai dengan tingginya curah hujan dan kelembaban udara.

- Rawa gambut ombrogen : Rawa gambut yang tidak terpengaruh (mengalami) masukan air banjir dari sungai. Rawa gambut ombrogen berbentuk kubah dan hampir seluruh masukan air berasal dari curah hujan.
- Rantai detritus : Mata rantai dalam jaring-jaring makanan yang meliputi perombakan bahan organik mati. Mata rantai detritus berperan penting dalam mendaur ulang materi dalam suatu ekosistem.
- Regresi air laut : Penurunan muka air laut akibat penurunan suhu global dan terjadinya akumulasi es di kutub-kutub bumi.
- Shrinkage* : Sering disebut sebagai penciutan, merupakan bentuk subsiden tanpa kehilangan massa dan merupakan perubahan volume tak balik. Penciutan terjadi akibat adanya gaya tarik menarik antar partikel-partikel tanah dengan lebih erat dibandingkan dalam keadaan jenuh. Semakin kering kondisi tanah, gaya ikat air di pori mikro ini akan semakin kuat. Bila muka air tanah diturunkan, dan terutama bila terjadi alterasi iklim mikro di permukaan, tanah lapisan atas akan mengering.
- Supersaturasi : Kondisi yang melibatkan dua fase (terlarut dan pelarut) dimana konsentrasi terlarut melebihi daya larut pelarut. Laju masukan hasil perombakan bahan organik yang sangat tinggi menyebabkan terjadinya supersaturasi dan mengubah konsistensi larutan dari cair menjadi gel dan kemudian didominasi oleh padatan yang akhirnya membentuk tubuh tanah gambut.
- Teras Pleistosen : Deposisi aluvial yang terjadi selama epik Pleistosen dan berbentuk teras di bawah kaki-kaki bukit pegunungan, misalnya di bawah kaki Bukit Barisan di pantai timur Sumatra, diselatan Schwaner dan Muller, dan di selatan Jayawijaya.
- Transgresi air laut : Kenaikan muka air laut akibat peningkatan suhu global dan terjadinya pencairan es di kutub-kutub bumi.
- Zona freatik : Zona saturasi (jenuh air) dibawah permukaan freatik (muka air tanah).
- Zona litoral : Area di sekitar pantai mulai dari batas pasang tertinggi sampai dengan suatu batas area yang berada dibawah permukaan laut secara permanen yang masih mengalami pengaruh arus pasang dan disipasi energi secara signifikan.
- Zona Vadose : Zona tidak jenuh air diatas permukaan freatik (muka air tanah) dimana sebagian pori tanah masih terisi udara.

1. Apa itu gambut?

Dalam memahami berbagai sistem alam yang berlaku di lahan gambut perlu terlebih dahulu diperjelas istilah-istilah berikut: tanah gambut (*peat soil*), lahan gambut (*peatland*), ekosistem (lahan) gambut (*peatland ecosystem*) dan hutan rawa gambut (*peat swamp forest*).

Tanah gambut

Istilah gambut atau tanah gambut merupakan istilah umum, atau istilah populer, atau nama lokal, yang sebenarnya justru tidak terdapat dalam definisi formal taksonomi tanah (*soil taxonomy*). Sehingga tidak heran untuk hal yang serupa atau hampir serupa dijumpai beragam sinonim di beragam tempat, seperti *peat, bog, fen*, dan sebagainya. Hal ini tak ubah dengan adanya beragam nama lokal untuk spesies yang sama, seperti padi, rice, uruchimai, yang secara formal dalam taksonomi tumbuhan bernama *Oryza sativa*. Di Indonesia sendiri nama gambut muncul sebagai adopsi nama desa dimana tanah jenis ini ditemukan (atau disadari keberadaannya) pertama kali, yaitu desa Gambut di Kalimantan Selatan.

Menurut definisi hukum yang berlaku di Indonesia (tanah) gambut adalah material organik yang terbentuk secara alami dari sisa-sisa tumbuhan yang terdekomposisi tidak sempurna dan terakumulasi pada rawa (Peraturan Pemerintah Nomor 71 tahun 2014 jo. Peraturan Pemerintah Nomor 57 tahun 2016). Sedangkan dalam definisi formal Taksonomi Tanah (*Soil Survey Staff, 1975*) tanah gambut disebut sebagai *Histosols* yaitu tanah-tanah dengan ketebalan solum organik minimal 40 cm, dengan tingkat komposisi bahan organik:

- Dalam keadaan jenuh air mempunyai kandungan C organik paling sedikit 18% jika kandungan liat dalam fraksi mineral 60% atau lebih, atau mempunyai C organik 12% atau lebih jika kandungan liat fraksi mineral 0-60%.
- Dalam keadaan tidak jenuh air mempunyai kandungan C organik minimal 20%.

Definisi diatas diperbarui pada tahun 1999 (*Soil Survey Staff, 1999*) sebagai berikut: Tanah organik (*Histosols*) adalah tanah yang memiliki bahan organik dengan ketentuan sebagai berikut

1. Tidak mengandung
 - *Permafrost* pada 100 cm teratas tanah; atau
 - *Gelic material* pada 100 cm teratas dan *permafrost* sampai kedalaman 200 cm tanah
2. Tidak memiliki sifat-sifat tanah andik (*andic*) dalam 60% atau lebih ketebalan dari permukaan tanah sampai kedalaman 60 cm, atau sampai kedalaman kontak litik (*lithic*), paralitik (*paralithic*), densik (*densic*), atau *duripan* (yang manapun yang paling dangkal); dan

3. Memenuhi satu atau lebih kriteria berikut:

- Lapisan bahan organik berada diatas bahan-bahan terfragmentasi, ber-arang, pumika dan/atau mengisi ruang-ruang interstisi, dan dibawah lapisan bahan-bahan tersebut terdapat kontak densik, litik atau paralitik; atau
- Bila digabungkan dengan ketebalan bahan-bahan terfragmen, ber-arang atau pumika, ketebalan total lapisan bahan organik dari atas permukaan tanah mencapai 40 cm atau lebih;
- Ketebalan lapisan bahan organik mencakup sepertiga dari total ketebalan tanah sampai ke kontak densik, litik, atau paralitik, tanpa adanya horizon mineral, atau dengan total ketebalan horizon mineral 10 cm atau kurang
- Berada dalam kondisi jenuh-air selama 30 hari atau lebih per tahun dalam tahun-tahun normal, atau didrainase secara buatan, total ketebalan lapisan bahan organik
 - Sekurang-kurangnya 60 cm jika 75% atau lebih volume mengandung serat kasar atau fibrik, atau jika $BD < 0.1 \text{ g/cc}$
 - Sekurang-kurangnya 40 cm jika kurang dari 75% volume mengandung serat kasar atau fibrik, atau jika $BD \geq 0.1 \text{ g/cc}$
- Volume bahan organik adalah 80 persen bila dihitung dari permukaan tanah sampai kedalaman 50 cm atau sampai lapisan *glacic* atau sampai kontak litik, paralitik atau densik (yang manapun yang paling dangkal)

Dalam bentuk ringkas, untuk sebagian besar lahan-lahan gambut tropis, definisi tanah gambut dapat disederhanakan sebagai : tanah dengan kandungan C organik minimal 20% dengan ketebalan lapisan bahan organik minimal 40 cm dari permukaan tanah dan mengalami kondisi jenuh air minimal 30 hari dalam setahun pada tahun-tahun normal bila tidak didrainase.

Lahan gambut

Lahan gambut adalah lahan dimana tanah gambut berada dengan luas minimum tertentu. Besaran luas minimum ini bersifat relatif dan tergantung pada skala dan satuan peta serta kesepakatan, kebiasaan atau *common practice* dalam sistem pemetaan di negara setempat. Pada umumnya luas minimum yang biasa digunakan adalah 0.25 hektar. Pada peta berskala 1:50000 area seluas 0.25 hektar ini akan terlihat sebagai sebuah fitur seluas 1mm^2 sedangkan pada peta berskala 1:250000 fitur tersebut akan terlihat seperti sebuah titik berukuran 0.2 mm x 0.2 mm sehingga hampir tidak terlihat sama sekali.

Ekosistem gambut

Dalam Peraturan Pemerintah Nomor 71 tahun 2014 jo. Peraturan Pemerintah Nomor 57 tahun 2016, ekosistem gambut didefinisikan sebagai tatanan unsur gambut yang merupakan satu kesatuan utuh menyeluruh yang saling mempengaruhi dalam membentuk keseimbangan, stabilitas, dan produktivitasnya. Di dalam ilmu ekologi ekosistem didefinisikan sebagai kesatuan spasial dan sistemik antara komponen biotik dan abiotik dimana terdapat siklus (neraca) materi dan aliran energi. Dengan demikian dalam konsep ekologi ekosistem lahan gambut adalah kesatuan spasial dan sistemik antara komponen biotik dan abiotik di lahan gambut dimana terdapat siklus (neraca) materi dan aliran energi. Ekosistem gambut beragam menurut lokasi pembentukan dan keberadaannya. Ada ekosistem gambut yang masih alami dan ada yang sudah berubah karena pengaruh manusia.



Gambar 1. Contoh ekosistem gambut di wilayah subtropis dan lintang tinggi: Bog (kiri) dan Fen (kanan)

Hutan rawa gambut

Hutan rawa gambut (HRG) adalah salah satu jenis ekosistem lahan gambut alami yang khas dan berada di wilayah hutan hujan tropis, terutama di Asia Tenggara (Indonesia, Malaysia, Brunei Darussalam, Thailand dan Vietnam). Hutan rawa gambut adalah kesatuan spasial dan sistemik antara komponen vegetasi rawa gambut tropis dan segala komunitas yang ada di dalamnya dengan tanah gambut, serasah, air, udara, dan komponen abiotik lainnya dimana berlangsung aliran energi, neraca air, neraca karbon, neraca nitrogen, dan neraca materi lainnya.

Hutan rawa gambut bersifat sangat rapuh karena salingketergantungan antar komponen vegetasi rawa gambut tropis, tanah gambut, dan air sangat tinggi. Kelestariannya terutama sangat tergantung pada kesehatan neraca air dan neraca karbon yang berlangsung di dalamnya.



Gambar 2. Contoh ekosistem hutan rawa gambut. Dalam gambar diatas diperlihatkan salah satu komponen unik dalam sistem HRG yaitu sistem sungai air hitam (blackwater stream).

2. Bagaimana gambut terbentuk?

Sampai pertengahan abad ke-20 para pakar cenderung meminjam model-model pembentukan lahan gambut sub-tropis dan lintang tinggi (yang umumnya bermula dari ekosistem danau atau cekungan rawa) untuk menerangkan proses pembentukan lahan-lahan gambut tropis. Namun mulai akhir abad ke-20, seiring dengan perkembangan sains, berkembang pula model-model yang lebih mewakili berdasarkan kajian langsung di wilayah tropis. Dua model pembentukan lahan gambut akan diterangkan secara ringkas (di-interpretasikan secara grafis dalam gambar-gambar dan skema oleh penulis), yaitu model Anderson (1964) dan model Furukawa (1994). Anderson mengembangkan model ini berdasarkan kajiannya di lahan basah Sarawak dan Brunei Darussalam, sedangkan Furukawa mengembangkan modelnya berdasarkan kajian di lahan basah Sumatera dan Kalimantan.

Model pembentukan gambut tropis Anderson

Anderson membagi rawa dataran rendah menjadi dua kelompok yaitu rawa air tawar (*freshwater swamp*) dan rawa gambut (*peatswamp*). Rawa air tawar berkembang di dekat dan sepanjang sungai serta mengalami banjir dari sungai secara periodik. Bila terjadi akumulasi bahan organik, gambut yang berkembang di dalam rawa tersebut cenderung memiliki kandungan liat dan geluh yang tinggi dan morfologi lahan cenderung tidak berkubah. Sebaliknya, rawa gambut tidak mengalami banjir dari sungai, berbentuk kubah, dan mempunyai substrat gambut yang oligotropik (miskin hara). Proses pembentukan rawa gambut melalui tiga fase.

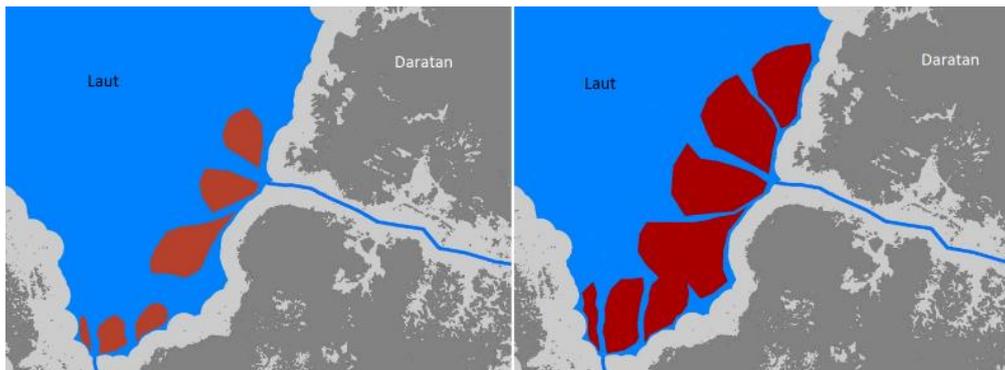
Pada fase pertama, mangrove membentuk koloni pada deposit aluvial delta dan teluk. Seiring meningkatnya deposisi di dataran pasang surut yang dikoloni mangrove garis pantai juga maju secara berangsur ke arah laut. Seiring waktu, mangrove di bagian belakang akan semakin jauh terpisah dari laut dan secara perlahan berubah dari kondisi genangan air payau ke genangan air tawar. Dalam kondisi ini lapisan gambut tipis terbentuk diatas lapisan lumpur mangrove.

Pada fase kedua, deposisi semakin jauh maju ke arah laut dan area mangrove belakang serta rawa air tawar juga maju mengikuti. Rawa air tawar paling belakang semakin terpisah dari pengaruh laut sedangkan sungai-sungai mulai mengalami arus balik (*backwater*) pada saat pasang tinggi karena menyempitnya ukuran dan berkurangnya jumlah saluran. Hal ini meninggalkan deposit aluvial sepanjang pinggir sungai sehingga akhirnya terbentuk tanggul sungai (*levee*). Tanggul alami ini terus berkembang sehingga lebih tinggi dari subsoil awal rawa. Pada fase ini akumulasi gambut mengalami percepatan dan mengembangkan struktur lentikular lahan gambut berkubah.

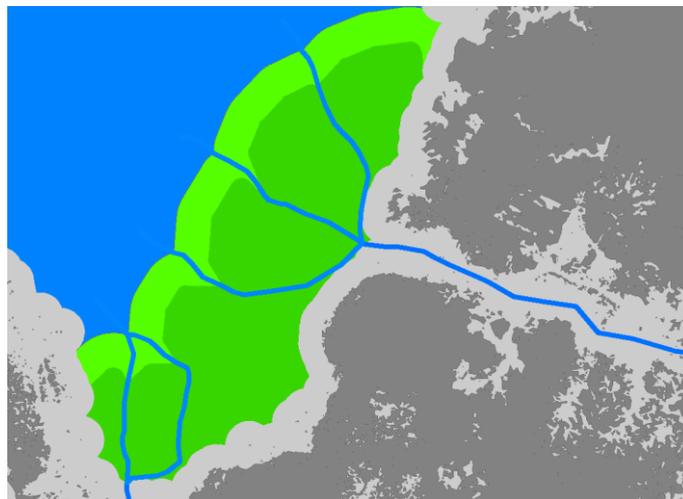
Pada fase ketiga, laju akumulasi pada bagian pusat berkurang dan terjadi pendataran puncak kubah gambut. Dengan terbentuk dan bertambah tingginya tanggul-tanggul sungai maka frekuensi, kedalaman, durasi kondisi saturasi semakin meningkat. Hal ini diikuti oleh kenaikan laju akumulasi bahan organik, sehingga ukuran kubah gambut jadi bertambah. Dengan semakin tingginya puncak kubah gambut akhirnya akan tercapai suatu batas dimana kubah air tidak mampu lagi mengikuti pertumbuhan kubah

gambut. Akibatnya laju akumulasi bahan organik di puncak kubah jadi berkurang (karena berkurangnya kondisi saturasi di permukaan tanah) dibandingkan yang terjadi di kaki kubah, sehingga terjadi pendataran puncak kubah.

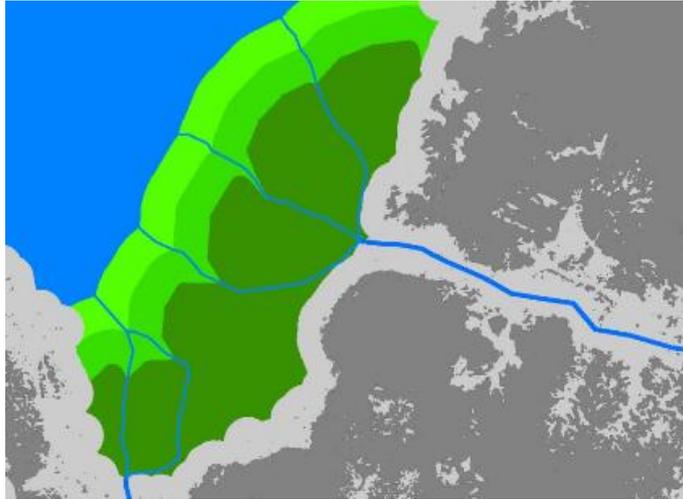
Dari urutan proses pembentukannya dapat diketahui bahwa model Anderson ini mengikuti teori majunya garis pantai (*advancing shoreline*) selama satu atau lebih periode regresi air laut yang terjadi di holosen akhir setelah 6000 tahun yang lalu. Salah satu kelemahan model Anderson adalah ia tidak dapat menjelaskan adanya lahan-lahan gambut berkubah di Indonesia yang tidak memperlihatkan ciri-ciri subsoil yang berhubungan dengan mangrove sama sekali.



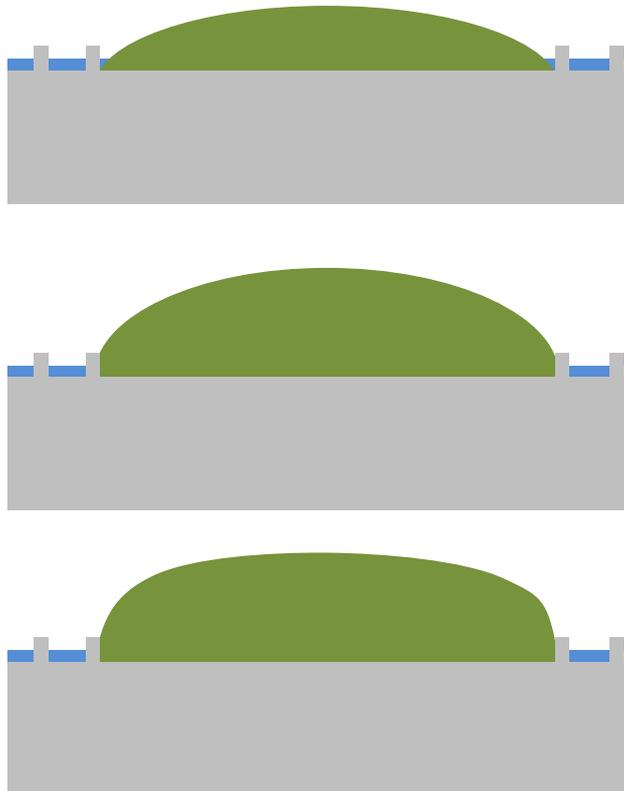
Gambar 3. Kondisi yang memungkinkan pembentukan gambut model Anderson: keberadaan delta atau teluk dengan proses deposisi di zona pasang surut (kiri). Proses deposisi dan regresi air laut memungkinkan berkembangnya area tidal flat dan majunya garis pantai (kanan).



Gambar 4. Fase 1 model pembentukan gambut Anderson: Mangrove (area hijau muda) mengkoloni area pasang surut delta atau teluk. Garis pantai maju ke arah laut, rawa bagian belakang perlahan berubah dari kondisi payau ke tawar. Gambut tipis terakumulasi di rawa air tawar (hijau tua).



Gambar 5. Fase 2 model pembentukan gambut Anderson: Garis pantai dan koloni mangrove (area hijau muda) semakin maju ke arah laut. Rawa air tawar paling belakang semakin terpisah dari laut. Tanggul sungai terbentuk dan semakin tinggi. Laju akumulasi gambut semakin cepat.



Gambar 6. Fase 3 model pembentukan gambut Anderson: Dengan terbentuk dan bertambah tingginya tanggul-tanggul sungai (atas) maka frekuensi, kedalaman, dan durasi kondisi saturasi semakin meningkat yang diikuti oleh kenaikan laju akumulasi bahan organik, sehingga ukuran kubah gambut bertambah (tengah). Dengan semakin tingginya puncak kubah gambut akan tercapai batas dimana kubah air tidak mampu lagi mengikuti pertumbuhan kubah gambut. Akibatnya laju akumulasi bahan organik di puncak kubah jadi berkurang (karena berkurangnya kondisi saturasi di permukaan tanah) dibandingkan yang terjadi di kaki kubah, sehingga terjadi pendataran puncak kubah (bawah).

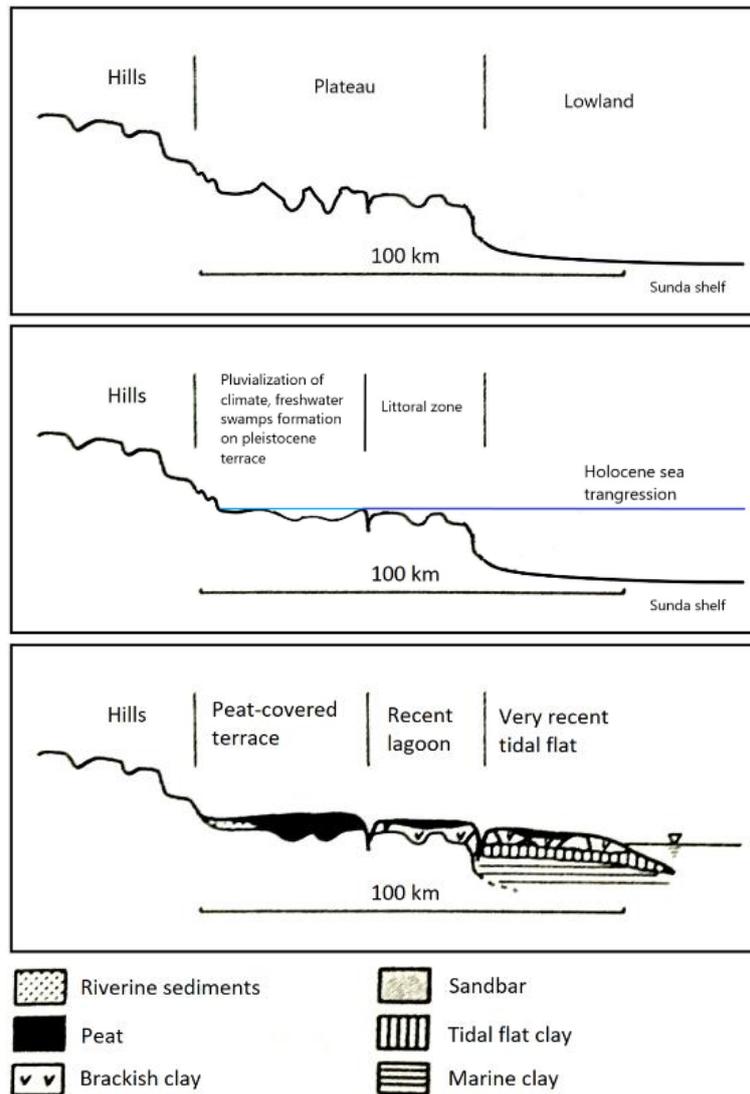
Model pembentukan gambut tropis Furukawa

Selama zaman es terakhir (*Pleistocene epoch*) permukaan laut lebih rendah sekitar 70 – 100 meter dari posisi sekarang. Pada saat itu Paparan Sunda dan Paparan Sahul membentuk dataran rendah yang luas sedangkan area yang saat ini menjadi dataran rendah di Sumatera, Borneo dan Papua merupakan area-area plato. Iklim pada saat itu sangat kering sehingga Sumatera, Borneo dan Papua didominasi oleh sabana. Hal ini menerangkan penyebab terkadang ditemukannya bercak-bercak merah pada sedimen liat dasar gambut di teras pleistosen. Setelah zaman es berakhir terjadi kenaikan air laut dan area yang sebelumnya merupakan plato berubah menjadi dataran rendah dan iklim berubah dari kering ke basah. Peralihan dari iklim sabana ke iklim basah merupakan faktor penting dalam model pembentukan gambut tropis Furukawa.

Pembentukan lahan gambut dimulai dengan transgresi air laut Holosen (sekitar 6000-7000 tahun yang lalu) bersamaan dengan pluvialisasi iklim yang ditandai dengan kenaikan curah hujan yang drastis. Dengan naiknya curah hujan terjadi kenaikan laju erosi dan sedimentasi yang memungkinkan terjadinya pendataran relief dan terbentuknya rawa-rawa air tawar di teras-teras pleistosen di bawah kaki bukit pegunungan. Iklim yang basah memungkinkan produktivitas ekosistem yang tinggi sebagai sumber bahan organik yang terakumulasi di rawa-rawa. Bagian-bagian vegetasi yang tumbang atau jatuh dan masuk ke bagian-bagian rawa yang tergenang permanen akan terawetkan. Bagian yang mati dan masih terpapar ke atmosfer melapuk, teroksidasi dan sebagian berubah menjadi substrat berwarna coklat-merah atau humus. Kondisi perhumid dan supersaturasi menjadi kunci terhambatnya dekomposisi sempurna. Dengan demikian terjadi akumulasi yang bersamaan antara substrat gambut yang terlapuk dan sisa-sisa vegetasi yang utuh. Gambut ini disebut oleh Furukawa sebagai gambut teras dan teridentifikasi (dari penanggalan karbon) berumur 4000 – 7000 tahun.

Bagian teras pleistosen yang berada di area pasang surut dikoloni oleh mangrove dan mengalami deposisi liat payau (*brackish clay*). Selama periode regresi air laut Holosen garis pantai maju secara perlahan ke arah laut dan area ini berangsur-angsur beralih dari payau ke tawar. Di masa ini terakumulasi bahan organik diatas sedimen liat payau sehingga terbentuk lapisan gambut tipis. Zona ini oleh Furukawa disebut sebagai recent lagoon karena berumur lebih muda (1000 – 2000 tahun) dan memiliki lapisan gambut lebih tipis daripada gambut teras.

Sementara itu zona di depan recent lagoon mengalami deposisi liat marin (*marine clay*) dan lumpur pasang surut (*tidal-flat clay*). Selama periode regresi air laut Holosen area ini perlahan-perlahan beralih menjadi mangrove yang mendeposisikan liat payau. Dengan semakin majunya garis pantai lingkungan ini juga akhirnya berubah dari payau ke tawar dan gambut tipis perlahan-lahan terakumulasi. Zona ini disebut oleh Furukawa sebagai *very-recent tidal flat*, karena berumur paling muda (sekitar 1000 tahun) dan memiliki gambut paling tipis.



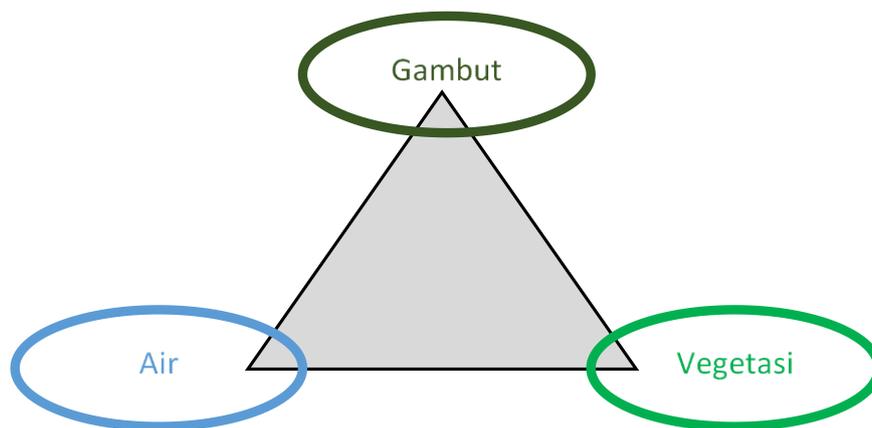
Gambar 7. Model pembentukan gambut Furukawa. Atas: Bentang alam pada epik Pleistosen memperlihatkan Paparan Sunda sebagai dataran rendah. Tengah: Kenaikan air laut Holosen menciptakan zona litoral tempat deposisi liat marin, liat pasang surut dan liat payau. Sementara pluvialisasi iklim menciptakan rawa-rawa air tawar di teras pleistosen. Bawah: Akumulasi bahan organik di teras pleistosen membentuk gambut teras. Regresi air laut holosen disertai dengan deposisi organik di zona litoral membentuk gambut recent lagoon dan very recent tidal flat. Diadaptasi dari Furukawa (1994).

Kombinasi model Anderson dan Furukawa

Bila dicermati terdapat banyak kemiripan antara model Anderson dan Furukawa. Model pembentukan gambut Furukawa untuk *recent lagoon* dan *very-recent tidal flat* pada prinsipnya serupa dengan model Anderson. Dengan demikian gabungan dari kedua model ini lebih bersifat representatif untuk kondisi Sumatra, Borneo dan Papua. Untuk zona *recent lagoon* dan *very-recent tidal flat* kita dapat mengadopsi model Anderson. Zona ini juga dapat kita gabungkan ke dalam satu kelompok dan disebut sebagai gambut pantai. Untuk zona gambut teras pleistosen kita dapat menggunakan model Furukawa, dan kita kelompokkan sebagai gambut teras.

3. Bagaimana kondisi alami gambut?

Bentuk alami lahan gambut di wilayah tropis adalah hutan rawa gambut (HRG). Sebagai sebuah ekosistem, HRG memerlukan tiga komponen kunci yaitu vegetasi rawa gambut tropis, tanah gambut, dan air. Ketiga komponen HRG ini membentuk saling ketergantungan rapuh dan sangat erat (Gambar 8), relatif lebih erat dibandingkan hal serupa yang dapat ditemukan pada sistem lahan kering. Keeratan hubungan antar komponen terlihat dari besarnya peran dan saling ketergantungan antar komponen dalam proses pembentukan dan keberlangsungan tanah gambut, serta dalam menjaga stabilitas neraca karbon dan neraca air yang menjadi faktor penentu kelestarian ekosistem HRG. Rapuhnya sistem HRG disebabkan oleh mudahnya sistem ini mengalami deteriorasi bila salah satu komponen mengalami gangguan. Kerapuhan dan saling-ketergantungan antar komponen sistem HRG yang unik akan dijelaskan pada bahasan-bahasan lebih lanjut.



Gambar 8. Segitiga hutan rawa gambut

Neraca karbon

Hutan rawa gambut dicirikan oleh keberadaan tanah gambut dimana vegetasi yang tumbuh di atasnya merupakan sumber materi pembentuk tanah itu sendiri (Wösten *et al*, 2006). Hutan rawa gambut juga dikenal sebagai cadangan karbon yang sangat penting (Andriess, 1988; Page dan Rieley, 1998), memainkan fungsi sebagai penyedia berbagai 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 yang utuh mencegah cadangan karbon raksasa ini terlepas ke atmosfer. Cadangan karbon di dalam ekosistem lahan gambut tidak bersifat statis tetapi berada dalam sebuah neraca karbon, seperti diberikan pada persamaan berikut.

$$\Delta S = I - O$$

Dimana

ΔS : Perubahan stok karbon (ton/hektar/tahun)

I : Input atau masukan karbon (ton/hektar/tahun)

O : Output atau keluaran (ton/hektar/tahun)

Neraca karbon merupakan sebuah proses sinambung yang berlangsung dalam jangka panjang. Selama laju input karbon melebihi laju keluaran neraca akan berada dalam keadaan positif dan terjadi akumulasi bahan organik. Bila laju input sama dengan output maka ekosistem berada dalam kondisi netral/stabil. Sebaliknya bila neraca karbon bernilai negatif maka stok karbon akan menyusut dan ekosistem tersebut terancam kelestariannya. Agar neraca karbon tetap dalam keadaan positif atau netral diperlukan kondisi: (1) tersedianya sumber bahan organik yang cukup dalam bentuk tutupan vegetasi rawa gambut asli, dan (2) terhambatnya dekomposisi sempurna substrat gambut.

Neraca air

Kondisi jenuh air (saturasi) diperlukan agar berlangsung kondisi anaerobik dalam area dan durasi yang cukup, dan ini hanya dapat terjadi bila neraca air dalam keadaan baik. Neraca air di lahan gambut disajikan dalam persamaan berikut

$$\Delta S = P + Q_i - Q_o - ET$$

Dimana

ΔS : Perubahan simpanan air dalam akuifer (mm/tahun)

P : Masukan (input) air dari curah hujan yang mencapai akuifer (mm/tahun)

Q_i : Masukan (input) air dalam bentuk aliran permukaan dan bawah permukaan tanah (mm/tahun)

Q_o : Keluaran (output) air dalam bentuk aliran permukaan dan bawah permukaan tanah (mm/tahun)

ET : Keluaran (output) air melalui evapotranspirasi (mm/tahun)

Di lahan gambut ombrogen, masukan air selain dari curah hujan sangat sedikit dan tidak signifikan, oleh karena itu komponen Q_i dapat diabaikan dan neraca air dapat disederhanakan dalam persamaan berikut

$$\Delta S = P - Q_o - ET$$

Atau dalam bentuk lebih sederhana

$$\Delta S = \text{Input} - \text{Output}$$

Di hutan rawa gambut yang masih baik neraca air jangka panjang tidak akan bernilai negatif, artinya besarnya Q_o dan ET tidak melebihi P. Hal ini dicapai dalam bentuk kesetimbangan alami yang unik. Untuk setiap karakteristik curah hujan tertentu di HRG tertentu besarnya keluaran air dari penguapan lantai hutan dan vegetasi HRG (ET) serta dari sungai-sungai air hitam alaminya (Q_o) juga sudah tertentu.

Evapotranspirasi merupakan komponen keluaran terbesar dari neraca air HRG (50% – 60% dari total input curah hujan). Curah hujan terkonsentrasi dalam periode 3 – 4 bulan musim hujan disertai periode genangan sehingga aliran permukaan mendominasi masukan ke sungai. Aliran air tanah hanya sedikit proporsinya, biasanya kurang dari 5% curah hujan tahunan.

Disamping itu keberadaan vegetasi HRG asli menciptakan topografi meso dan mikro yang unik di lantai hutan. Akar-akar lutut dan jalinan serasah dengan akar-akar yang muncul di permukaan setempat membuat permukaan lahan gambut tidak rata, menciptakan bagian-bagian depresi dan gundukan. Topografi seperti ini meredam laju aliran air di permukaan tanah, menyebabkan pola aliran menjadi baur dan ikut berperan penting dalam menjaga timing dan besarnya aliran masuk ke sungai-sungai air hitam. Dengan demikian terlihat peranan penting vegetasi asli HRG dalam mengatur neraca air lahan gambut yang sangat krusial dalam menstabilkan neraca karbon.

Proses-proses unik di ekosistem hutan rawa gambut

Substrat gambut merupakan media tempat vegetasi rawa gambut tumbuh dan berkembang, menjadi penyangga mekanis perakaran dan menopang beban biomassa di atasnya, merupakan medium reaksi biokimia tanah, dan proses pertukaran materi antara akar dengan lingkungan perakaran. Daya topang normal (*bearing capacity*) dan daya topang geser (*shear strength*) tanah gambut sebenarnya sangat rendah dibandingkan dengan tanah-tanah mineral. Bagi vegetasi berukuran kecil kondisi ini tidak menjadi kendala penting. Tetapi bagi vegetasi pohon yang besar dan tinggi beban normal dan momen gaya yang besar dapat menjadi masalah kesetimbangan mekanis dalam sistem rawa gambut jika tidak ada adaptasi khusus untuk mengatasinya. Oleh karena itu vegetasi rawa gambut yang berupa pohon mengembangkan adaptasi morfologi berupa basal footing yang luas dengan “akar jangkar” vertikal yang rapat di bawahnya. Dengan adaptasi morfologi ini pohon-pohon rawa gambut dapat “mengapung” di atas substrat organik yang labil secara mekanis. Dengan cara ini HRG menciptakan sistem yang dapat menampung vegetasi dengan kerapatan biomassa yang cukup besar yang berarti menjamin produktivitas primer yang besar sebagai sumber masukan bahan organik.

Sisa-sisa bahan organik seperti ranting dan daun menumpuk sebagai serasah di lantai hutan dan diuraikan oleh arthropoda dalam mata-rantai detritus awal, dilanjutkan oleh jamur dan aktinomisetes sebagai mata-rantai detritus lanjut. Partikel-partikel kecil hasil pelapukan berskala mikrometer dapat tercuci dalam proses infiltrasi sampai kedalaman beberapa puluh sentimeter di bawah permukaan gambut. Proses pelapukan sebagian besar terjadi pada lapisan atas permukaan gambut, sementara dinamika muka air tanah terbatas pada sekitar 50 cm teratas solum. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa siklus hara yang cepat terkonsentrasi pada lapisan atas solum gambut dimana akar-akar aktif tumbuhan rawa gambut berada. Keberadaan jamur dan aktinomisetes yang melimpah di lantai hutan dan disekitar perakaran tumbuhan membantu mempercepat daur ulang unsur hara secara langsung (daur detritus langsung). Mekanisme ini membantu keberlangsungan ekosistem rawa gambut ombrogen yang sebenarnya miskin hara.



Lahan gambut dikonversi menjadi lahan perkebunan sawit, dengan melakukan pembuatan kanal-kanal (drainase). (© Wetlands International Indonesia)

4. Apa yang terjadi jika hutan rawa gambut dikonversi untuk kegunaan lain?

Rusaknya dua neraca penting HRG

Konversi hutan rawa gambut dapat menyebabkan kerusakan pada berbagai sistem alam yang ada di dalamnya. Jika kerusakan tersebut terjadi pada salah satu sistem vital (diantaranya neraca karbon dan neraca air) akan terjadi deteriorasi pada ekosistem tersebut. Neraca karbon hutan rawa gambut dapat mengalami kerusakan bila terjadi deforestasi/degradasi vegetasi asli hutan rawa gambut dan/atau akselerasi laju dekomposisi gambut. Vegetasi rawa gambut asli memiliki kerapatan biomassa yang tinggi, berkisar antara 56 sampai 200 ton karbon per hektar dengan rata-rata 124 ton karbon per hektar (Rochmayanto *et al*, 2014). Menurut Jauhiainen *et.al* (2001) keluaran karbon dari tanah gambut dalam bentuk metana (yang terjadi sebagai hasil dekomposisi anaerobik) mencapai 19.3 kg karbon per hektar per tahun. Dengan demikian, agar tercapai kondisi neraca karbon yang positif, diperlukan masukan karbon dari vegetasi HRG yang sehat ke tanah gambut sekurang-kurangnya 19.3 kg karbon per hektar per tahun. Ini berarti dari setiap ton karbon biomassa tegakan HRG, serasah dan bahan organik mati yang benar-benar mampu menjadi input dalam neraca karbon tanah gambut dibawahnya hanya sebesar 153 gram/tahun; karena sebagian besar serasah dan bahan organik yang jatuh ke lantai hutan akan melapuk, terurai dan teroksidasi. Dengan kata lain diperlukan kerapatan biomassa tegakan yang sangat besar untuk mempertahankan neraca karbon tanah gambut. Bila kerapatan biomassa berkurang, seperti akibat penebangan, kebakaran hutan dan sebagainya, laju masukan bahan organik ke lantai hutan akan berkurang pula dan tidak mampu mengkompensasi kehilangan karbon dari substrat gambut; apalagi bila seluruh tutupan vegetasi hilang akibat deforestasi dan laju dekomposisi gambut ikut meningkat.

Kelestarian hutan rawa gambut memerlukan kondisi jenuh air (saturasi) atau mendekati saturasi dalam area dan durasi yang cukup agar tercipta kondisi anaerobik yang menghambat laju dekomposisi sempurna substrat gambut. Umumnya hal ini dapat terjadi bila muka air tanah tinggi (dekat ke permukaan atau tergenang). Dalam kondisi ini keseluruhan atau sebagian besar solum tanah gambut berada dalam kondisi anaerobik. Selain itu diperlukan juga naungan tajuk yang cukup untuk menjaga iklim mikro yang optimal di lantai hutan. Keberadaan tajuk vegetasi asli HRG yang rapat mengurangi insolasi (*insolation atau incoming solar radiation*) yang mencapai lantai hutan, membuat suhu di lantai hutan menjadi lebih sejuk (2°C - 5°C lebih rendah dibandingkan tanpa tutupan tajuk) dan memperlambat laju reaksi biokimia (respirasi heterothrophic proses dekomposisi mikrobial). Tutupan tajuk yang rapat juga menghentikan atau memperlambat tiupan angin dan mencegah turbulensi udara, menjaga kelembaban yang tinggi di lantai hutan yang selanjutnya menekan laju evaporasi dan ikut menjaga kesehatan neraca air.

Konversi hutan rawa gambut dapat merusak neraca air bila terjadi kerusakan/kehilangan tutupan vegetasi asli dan/atau dibangunnya saluran-saluran pembuangan air artifisial (kanal-kanal drainase). Dalam suatu neraca air, curah hujan merupakan peubah iklim yang relatif tidak dapat dirubah manusia, dan menjadi karakteristik unik iklim setempat. Sebaliknya, keluaran dari sistem (yaitu Qo dan ET) dapat diubah oleh manusia. Hilangnya vegetasi juga dapat meningkatkan keluaran air dari sistem lahan gambut dengan terjadinya alterasi iklim mikro di lantai hutan atau permukaan tanah. Kanal-kanal drainase menambah keluaran dari sistem dengan menambah total debit keluar. Bila keluaran air dari sistem meningkat, sementara input air ke dalam sistem relatif tetap, maka akan terjadi pengurangan simpanan, ditandai dengan turunnya muka air tanah gambut. Hal ini dapat dijelaskan dari hubungan muka air tanah (*water table*) dengan perubahan simpanan sebagai berikut

$$H_i = H_{i-1} + \frac{\Delta S}{f} \Delta t$$

Dimana

- H_i : Tinggi muka air tanah pada suatu waktu (cm)
- H_{i-1} : Tinggi muka air tanah pada waktu sebelumnya (cm)
- ΔS : Perubahan simpanan air tanah selama selang waktu antara i dan i-1 (cm/hari)
- Δt : Selang waktu antara i dan i-1 (hari)
- f : Koefisien simpanan air tanah (-)

Apa itu subsiden?

Dari penjelasan sebelumnya dapat dilihat bahwa tinggi muka air tanah lahan gambut akan turun bila ΔS bernilai negatif, yaitu bila keluaran air melebihi masukan. Penurunan muka air tanah ini akan berdampak pada laju subsiden. Subsiden (Inggris: *subsidence*) dalam pengertian sederhana adalah amblesan lahan atau penurunan muka lahan. Dalam berbagai literatur subsiden sering juga disebut sebagai *settlement*, dan pada prinsipnya kedua istilah ini mengandung makna yang sama.

Subsiden terjadi karena adanya penurunan volume tanah menurut teori perubahan volume Eggelsmann (1976) dan Schothorst (1977). Penurunan volume tanah dapat terjadi tanpa kehilangan massa atau disertai dengan kehilangan massa. Perubahan volume ini dapat dibayangkan dengan mengandaikan tanah gambut bagaikan selapis roti tawar. Volume roti tawar dapat berkurang bila ditekan sehingga mengempis, ini adalah perubahan volume tanpa kehilangan massa. Volumennya dapat juga berkurang bila

roti tersebut diiris selapis, dan ini adalah perubahan volume dengan kehilangan massa. Ada empat mekanisme subsiden di lahan gambut, yang dapat terjadi sendiri-sendiri atau bersama-sama, dalam bentuk kehilangan massa atau tanpa kehilangan massa, yaitu: konsolidasi, kompaksi, *shrinkage* dan oksidasi.

Konsolidasi

Konsolidasi atau *consolidation*, sering juga disebut kompresi atau *compression*, merupakan bentuk subsiden tanpa kehilangan massa yang terjadi akibat perubahan effective stress pada zona freatik (dibawah muka air tanah). Perubahan effective stress di tanah gambut terutama terjadi karena penurunan muka air tanah yang signifikan melebihi batas normal yang pernah terjadi secara alami sebelumnya. *Effective stress* merupakan tekanan vertikal bersih yang bekerja pada tubuh tanah, berasal dari beban massa tanah itu sendiri dan diimbangi oleh gaya apung (*buoyancy*) air tanah. Bila seluruh atau sebagian besar kolom tanah dalam kondisi jenuh air maka sebagian besar kolom tanah mengalami gaya apung dari tekanan air pori. Bila muka air tanah diturunkan sebagian teratas kolom tanah kehilangan gaya apung sehingga terjadi penambahan *effective stress*.

Konsolidasi mengikuti hukum-hukum fisika empiris dan mekanika tanah dimana teori konsolidasi Terzaghi (1943) masih cukup luas digunakan hingga saat ini. Konsolidasi terdiri atas dua komponen: konsolidasi primer dan sekunder. Terkadang ditemukan juga konsolidasi tersier, tetapi besarnya tidak signifikan sehingga seringkali dapat diabaikan. Konsolidasi primer merupakan komponen terbesar dan terjadi di saat dimulainya drainase, dan biasanya berlangsung singkat dalam hitungan beberapa hari sampai beberapa minggu. Secara praktis, dalam konteks lahan gambut, dapat dikatakan bahwa konsolidasi primer berakhir di tahun pertama drainase, dan dengan demikian dapat diperlakukan sebagai one-time event dan diskrit. Besarnya konsolidasi primer dapat diperkirakan sebagai berikut:

$$\Delta L_p = L_0 \frac{C_p}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0} \right)$$

Dimana

ΔL_p : Konsolidasi primer (m)

L_0 : Ketebalan gambut (m)

C_p : Koefisien kompresi primer (-)

e_0 : Rasio ruang pori (-)

σ_0 : *Effective stress* yang bekerja ditubuh tanah sebelum muka air tanah diturunkan (Pa)

σ_1 : *Effective stress* yang bekerja ditubuh tanah setelah muka air tanah diturunkan (Pa)

Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa besarnya konsolidasi primer tergantung pada ketebalan gambut, sifat-sifat mekanis tanah, dan kedalaman drainase. Gambut-gambut tebal akan mengalami dampak konsolidasi yang lebih besar. Demikian juga, semakin dalam drainase akan memperbesar *effective stress* dan konsolidasi yang bekerja di tubuh tanah.

Konsolidasi sekunder bersifat *time-dependent*, besarnya sebanding dengan ketebalan gambut, dan lajunya berkurang menurut waktu. Konsolidasi sekunder dapat terjadi bersamaan dengan, atau begitu konsolidasi primer akan berakhir. Dalam penerapan praktis, bila melibatkan jangka waktu yang panjang, katakanlah tahunan, konsolidasi sekunder dapat diasumsikan dimulai bersamaan dengan terjadinya konsolidasi primer. Model konsolidasi sekunder diberikan pada persamaan berikut.

$$\Delta L_s = L_0 \frac{C_s}{1 + e_0} \log \left(\frac{t}{t_0} \right)$$

Dimana

- ΔL_s : Konsolidasi sekunder dalam rentang waktu t_0 ke t (cm)
- L_0 : Ketebalan gambut pada waktu t_0 (cm)
- C_s : Koefisien kompresi sekunder (-)
- e_0 : Rasio ruang pori (-)
- t_0 : Waktu referensi konsolidasi, minimal tahun 1 (tahun)
- t : Waktu (tahun)

Besarnya konsolidasi sekunder relatif lebih kecil dibandingkan konsolidasi primer. Walaupun demikian, di lahan gambut kontribusi konsolidasi sekunder cukup signifikan dan patut diperhitungkan.

Kompaksi

Kompaksi atau compaction, merupakan bentuk subsiden tanpa kehilangan massa, seringkali merupakan perubahan volume tak balik, merupakan proses yang bekerja melalui gaya luar, dapat berupa beban (*load*) pada permukaan gambut, atau vibrasi yang merambat melalui matriks gambut yang menyusun ulang dan mempersempit jarak antar partikel-partikel gambut, yang selanjutnya diperkuat oleh gaya-gaya kohesi, adhesi, dan tegangan matriks. Kompaksi terbatas pada lokasi-lokasi yang mengalami beban atau rekayasa, seperti area jalan, bangunan, timbunan tanah dan sebagainya. Besarnya kompaksi berkorelasi dengan beban yang diterima tanah, sebagai berikut.

$$C = d_0 \times \alpha \times \log \left(\frac{P_1}{P_0} \right)$$

Dimana

- C : Kompaksi (m)
- d_0 : Ketebalan zona vadose gambut (m)
- α : Koefisien kompaksi (-)
- P_1 : Total stress di di zona vadose sebelum ada beban (Pa)
- P_0 : Total stress di di zona vadose setelah ada beban (Pa)

Shrinkage

Penciutan atau *shrinkage* juga merupakan bentuk subsiden tanpa kehilangan massa dan merupakan perubahan volume tak balik yang terjadi dalam kondisi tidak jenuh air. Proses ini berhubungan dengan meningkatnya tegangan negatif air tanah pada matriks gambut dalam zona vadose, terutama di dekat permukaan tanah. Dalam keadaan tidak jenuh, air dalam pori mikro menarik (mengikat) partikel-partikel tanah dengan lebih erat dibandingkan dalam keadaan jenuh. Semakin kering kondisi tanah gaya ikat air di pori mikro ini akan semakin kuat. Gaya ikat ini berasal dari tegangan permukaan air yang bekerja pada antar muka air-udara di dalam pori mikro. Oleh karena itu besarnya shrinkage sangat ditentukan oleh perubahan kadar air tanah. Bila muka air tanah diturunkan, dan terutama bila terjadi alterasi iklim mikro di permukaan, tanah lapisan atas akan mengering. Penurunan kadar air tanah dari θ_0 ke θ_1 akan mengakibatkan penciutan tanah atau naiknya bulk density tanah gambut dari B_0 ke B_1 yang terlihat sebagai *shrinkage* E sebagai berikut (Rais, 2016).

$$E = d_0 \frac{B_1 - B_0}{B_1}$$

Dimana

- E : Shrinkage (cm)
- d_0 : Ketebalan zona vadose gambut yang mengalami perubahan kadar air (cm)
- B_0 : Kerapatan lindak (*bulk density*) tanah gambut pada moisture ratio v_0 (g/cm³)
- B_1 : Kerapatan lindak (*bulk density*) tanah gambut pada moisture ratio v_1 (g/cm³)

sedangkan

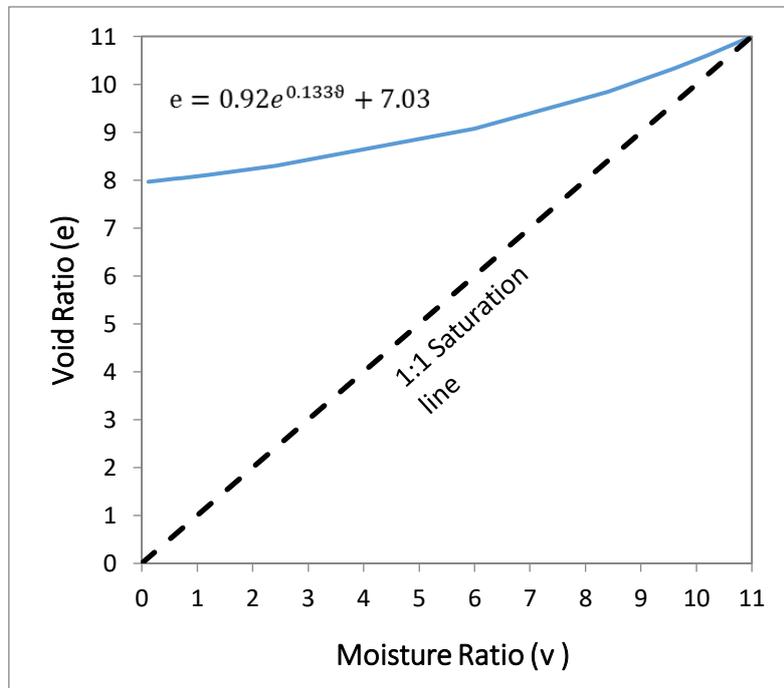
$$B_0 = \rho_s \left(1 + c + a \cdot \exp \left(b \cdot \theta_0 \frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \right)^{-1}$$

$$B_1 = \rho_s \left(1 + c + a \cdot \exp \left(b \cdot \theta_1 \frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \right)^{-1}$$

$$v = \theta \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

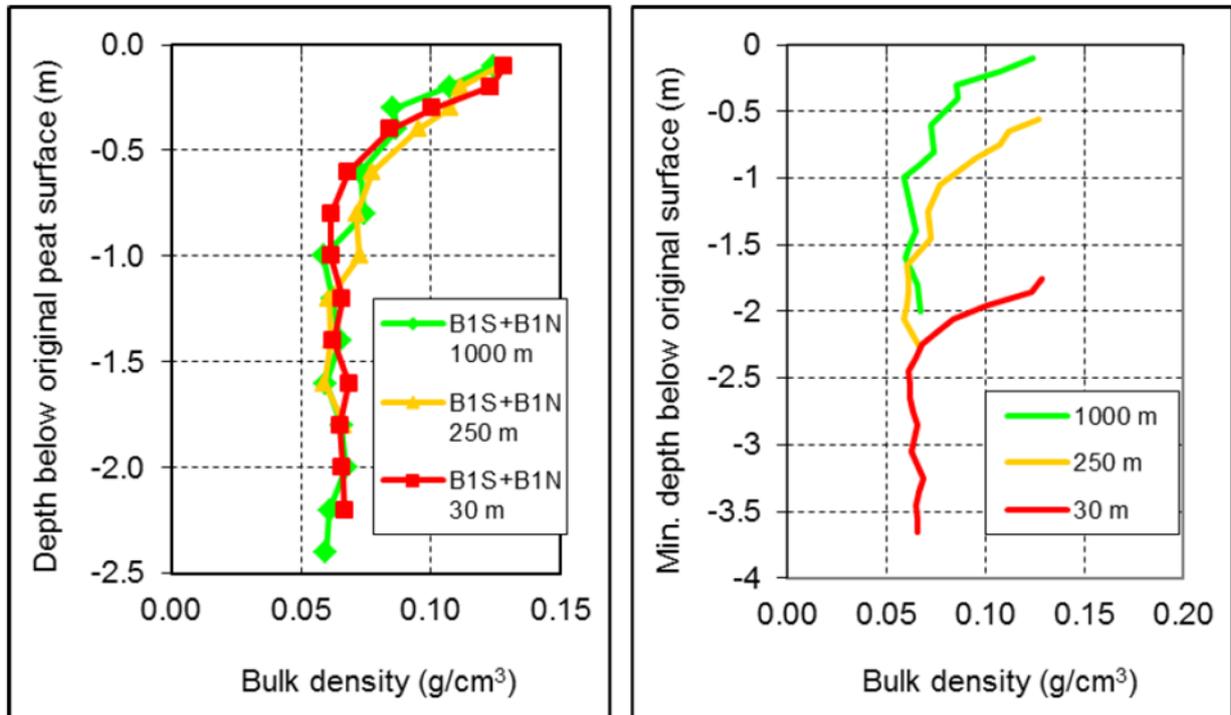
Dimana

- ρ_s : Kerapatan butir (particle density) tanah gambut (g/cm³)
- ρ_w : Massa jenis air (1 g/cm³)
- v_0 : Moisture ratio sebelum dikeringkan (g/cm³)
- v_1 : Moisture ratio setelah dikeringkan (g/cm³)
- θ_0 : Kadar air volumetrik sebelum dikeringkan (cm³/cm³)
- θ_1 : Kadar air volumetrik setelah dikeringkan (cm³/cm³)
- a, c : Konstanta regresi *Soil Shrinkage Curve* (SSC) (-)



Gambar 9. Contoh Soil Shrinkage Curve: hubungan antara void ratio (e) dengan moisture ratio (v).

Shrinkage dapat cukup signifikan di tanah-tanah gambut bertekstur halus dan besarnya beragam menurut kedalaman drainase dan tingkat kekeringan permukaan gambut. Besarnya *shrinkage* bersifat diferensial menurut kedalaman oleh sebab itu kita menemukan *bulk density* lahan gambut yang didrainase semakin besar bila mendekati permukaan. Contoh profil *bulk density* menurut kedalaman dari permukaan tanah dapat dilihat pada Vernimmen *et al.* (2014).



Gambar 10. Profil distribusi vertikal *bulk density* pada lahan yang didrainase yang memperlihatkan *bulk density* semakin tinggi di dekat permukaan tanah. Sumber: Vernimmen *et al.* (2014).

Oksidasi

Oksidasi atau *oxidation*, adalah bentuk subsiden dengan kehilangan massa, merupakan perubahan volume tak balik (*irreversible volume change*), disebabkan oleh proses oksidasi atau mineralisasi karbon menjadi air dan karbon dioksida atau metana. Oksidasi bahan organik gambut terjadi pada lapisan teratas tanah melalui oksidasi lambat (proses-proses biokimia dekomposisi oleh mikroba tanah, pada kedalaman beberapa cm lapisan teratas) atau dengan sangat cepat (selama kebakaran lahan lahan gambut, yang dapat mencapai puluhan cm lapisan teratas). Pada kondisi aerobik dimana suplai oksigen mencukupi, laju oksidasi gambut berlangsung jauh lebih cepat dibandingkan dalam kondisi anaerobik (dalam keadaan suplai oksigen terbatas). Pada oksidasi aerobik kandungan karbon dalam gambut terlepas menjadi CO₂ dan air melalui pernafasan sel mikrobial (heterothrophic respiration) atau pembakaran. Pada oksidasi anaerobik kandungan karbon gambut dilepaskan menjadi CH₄ dalam proses methanogenesis.

Baik oksidasi aerobik maupun anaerobik menyebabkan hilangnya karbon dari substrat gambut, karena CO₂ dan CH₄ keduanya berada dalam fase gas atau terlarut, tidak dapat bertahan lama dalam ruang pori atau air tanah, sehingga akhirnya gas-gas ini terlepas ke atmosfer, dan disebut sebagai emisi. Beberapa hasil riset di Indonesia dan negara-negara Asia Tenggara lainnya telah menghasilkan perkiraan laju emisi

CO₂ dan CH₄, dua spesies Gas Rumah Kaca (GRK) yang paling penting di lahan gambut, seperti diberikan pada *Supplement Table* Panduan Inventori GRK yang dirilis oleh *International Panel for Climate Change* (IPCC) pada tahun 2013. Angka-angka yang disajikan dalam tabel tersebut disebut faktor emisi atau *emission factor* (EF), berbasis *land use*, dan dinyatakan dalam laju emisi GRK setara berat CO₂ atau C per satuan luas lahan per satuan waktu. Contoh beberapa nilai EF yang dinyatakan berlaku untuk kondisi Asia Tenggara disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Faktor emisi (EF) untuk GRK CO₂ pada beberapa *land use*, dikutip dari IPCC 2013.

Land use	Contoh	EF CO ₂ (ton C ha ⁻¹ th ⁻¹)
Perkebunan di lahan gambut dengan drainase, dengan rotasi yang tidak diketahui atau rotasi panjang	Perkebunan kelapa sawit di lahan gambut	15
Perkebunan di lahan gambut dengan drainase, dengan rotasi pendek	Perkebunan akasia di lahan gambut	20
Tanaman pangan dengan drainase, termasuk yang menerapkan rotasi bera (<i>fallow</i>)	Pertanian hortikultura di lahan gambut	14
Tanaman padi dengan drainase	Pertanian padi non-irigasi di lahan gambut	9.4

Laju subsiden akibat oksidasi gambut dapat diperkirakan dengan menggunakan data laju emisi atau konstanta faktor emisi pada tipe-tipe *land use* yang sesuai. Prinsip dasarnya adalah dengan melakukan *back-calculating* untuk menghitung ketebalan gambut ekuivalen yang hilang akibat oksidasi berdasarkan laju emisi (EF) dan karakteristik fisik gambut pada lahan yang dikaji. Model untuk *back-calculating* ini diberikan pada persamaan berikut.

$$O_t = \frac{1}{C_c} \times \frac{\Gamma}{\rho_b} \times \frac{MA_c}{MM_{GRK}}$$

Dimana

- O_t : Laju subsiden akibat oksidasi gambut pada waktu t (m/tahun)
- C_c : Fraksi massa karbon gambut, disebut juga kandungan karbon gambut (kg/kg)
- Γ : laju emisi atau faktor emisi (kg/m²/tahun)
- ρ_b : Kerapatan lindak gambut (kg/m³)
- MA_c : Berat atom karbon (12 Dalton)
- MM_{GRK} : Berat molekul setara GRK yang disajikan pada EF (Dalton)

Ringkasan subsiden

Dalam bentuk ringkas, subsiden di lahan gambut merupakan gabungan dari seluruh komponen-komponennya

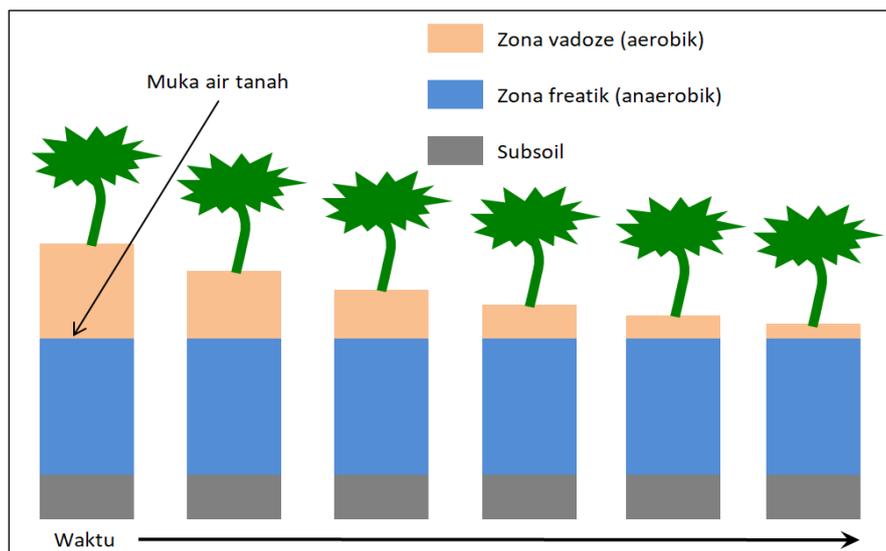
$$S = \Delta L_p + \Delta L_s + C + E + O \cdot \Delta t$$

Konsolidasi primer berlangsung hanya sekali di awal drainase yang besarnya bervariasi dari beberapa cm pada gambut tipis sampai mencapai sekitar 2 meter di gambut tebal. Konsolidasi sekunder berlangsung hanya beberapa centimeter per tahun dan besarnya menurun sepanjang waktu, tetapi bila diakumulasikan dalam jangka panjang kontribusinya bisa cukup signifikan. Subsiden akibat kompaksi biasanya terbatas pada lokasi-lokasi yang mendapat beban permukaan, dan dalam kebanyakan kasus seringkali dapat diabaikan. *Shrinkage* dapat cukup signifikan di tanah-tanah gambut bertekstur halus dan besarnya beragam menurut kedalaman drainase dan tingkat kekeringan permukaan gambut. Laju subsiden akibat oksidasi di lahan gambut yang didrainase berlangsung selama kondisi hidrologis dan iklim tidak berubah. Lajunya juga beragam dari beberapa cm per tahun sampai mencapai 10 cm/tahun. Dalam jangka panjang subsiden akibat oksidasi dapat menjadi komponen terbesar.

5. Apa yang dimaksud dengan *drainability limit*?

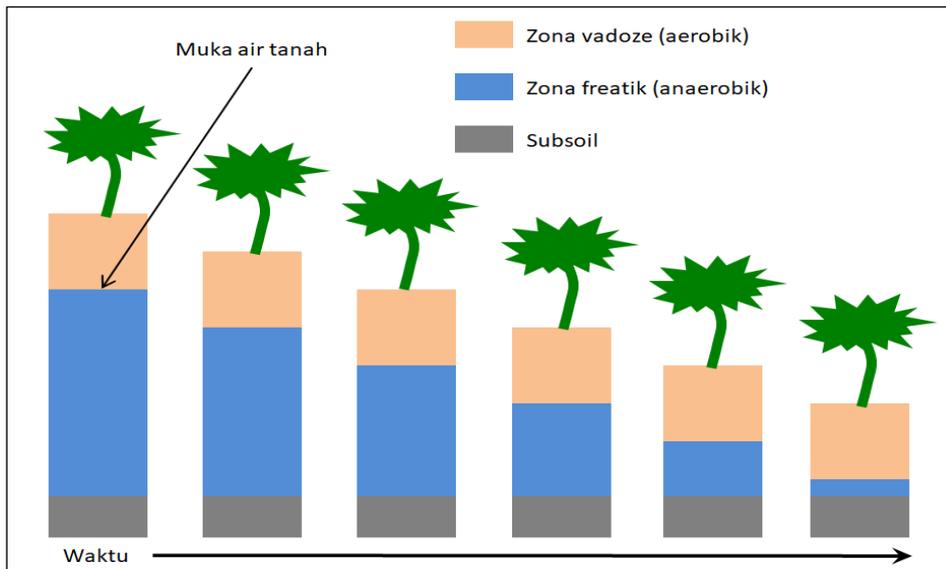
Lingkaran setan drainase

Berdasarkan paparan sebelumnya dapat dipahami bahwa laju subsiden akan berlangsung cepat di tahun awal dilakukannya drainase, karena adanya konsolidasi primer, laju konsolidasi sekunder yang tinggi, dan mungkin juga disertai *shrinkage* dan kompaksi. Sementara itu laju subsiden akibat oksidasi substrat gambut cenderung proporsional dengan kedalaman drainase. Dengan berjalannya waktu, permukaan lahan akan semakin turun dan mendekati muka air tanah (Gambar 11), diikuti oleh penurunan laju subsiden secara perlahan. Ini merupakan mekanisme homeostatis alam yang memperlambat kehilangan gambut dan berusaha mencapai kesetimbangan baru.

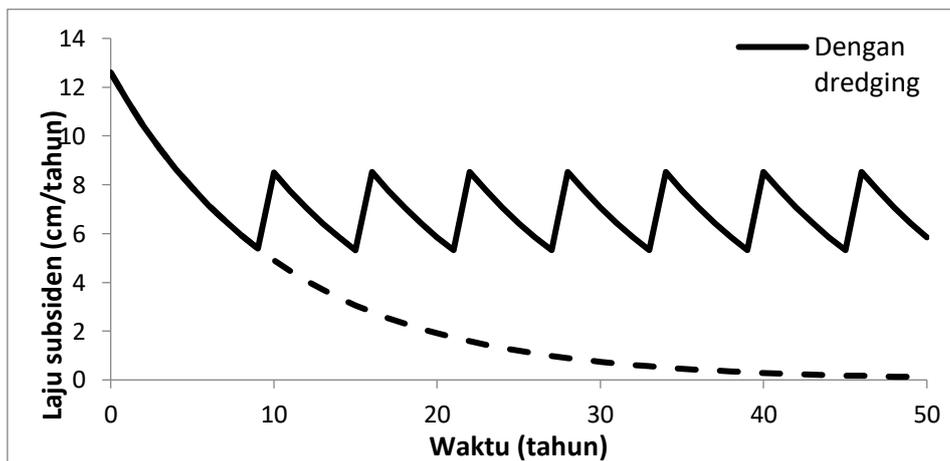


Gambar 11. Ilustrasi subsiden pada lahan yang didrainase tanpa dilakukan dredging berkala: permukaan lahan turun dengan berlanjutnya waktu sementara muka air tanah relatif tetap. Muka air tanah berangsur-angsur menjadi dangkal dan laju subsiden berangsur-angsur berkurang.

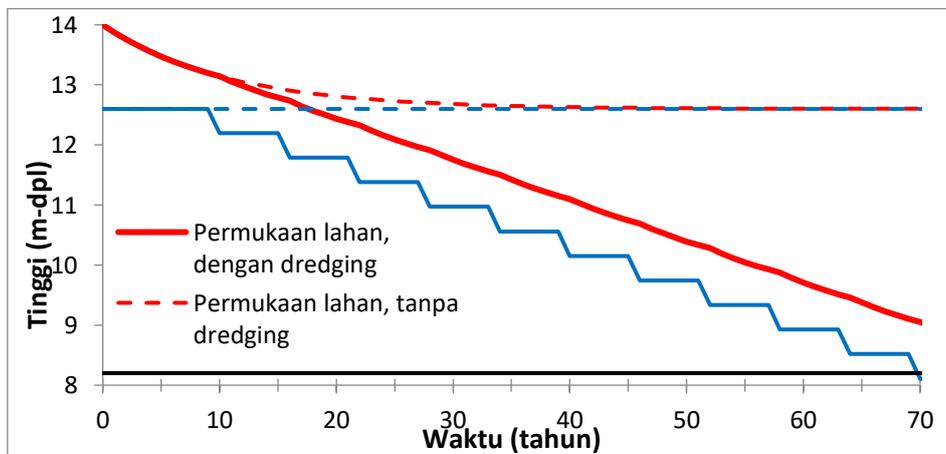
Dari sudut pandang agronomi kondisi ini tidak menguntungkan pertumbuhan tanaman, karena subsiden menyebabkan berkurangnya zona aerobik yang tersedia untuk perakaran tanaman. Oleh karena itu pelaku budidaya akan melakukan pendalaman saluran (*dredging*, atau disebut juga cuci parit) untuk memperdalam kembali muka air tanah. Dengan bertambahnya kedalaman muka air tanah laju subsiden akan meningkat, dan akhirnya muka air tanah akan menjadi dangkal kembali. Pelaku budidaya akan kembali melakukan dredging dan proses ini berlanjut menjadi lingkaran setan drainase. Dengan lingkaran setan ini titik kesetimbangan yang dapat memperlambat laju subsiden tidak akan pernah tercapai. Subsiden hanya akan berhenti setelah keseluruhan lapisan gambut tersebut habis teroksidasi atau bila dicapainya *drainability limit*. Bandingkan gambar 11 dengan 12 dan lihat juga gambar 13 dan 14 sebagai perbandingan laju subsiden dengan dan tanpa dredging.



Gambar 12. Ilustrasi subsiden pada lahan yang didrainase dengan menerapkan dredging berkala: Permukaan lahan turun dengan berlalunya waktu, tetapi muka air tanah juga diperdalam secara berkala. Muka air tanah dipertahankan relatif tetap dalam jangka panjang, subsiden tidak dapat berhenti.



Gambar 13. Laju subsiden tipikal di lahan gambut yang didrainase dengan dan tanpa dredging berkala.



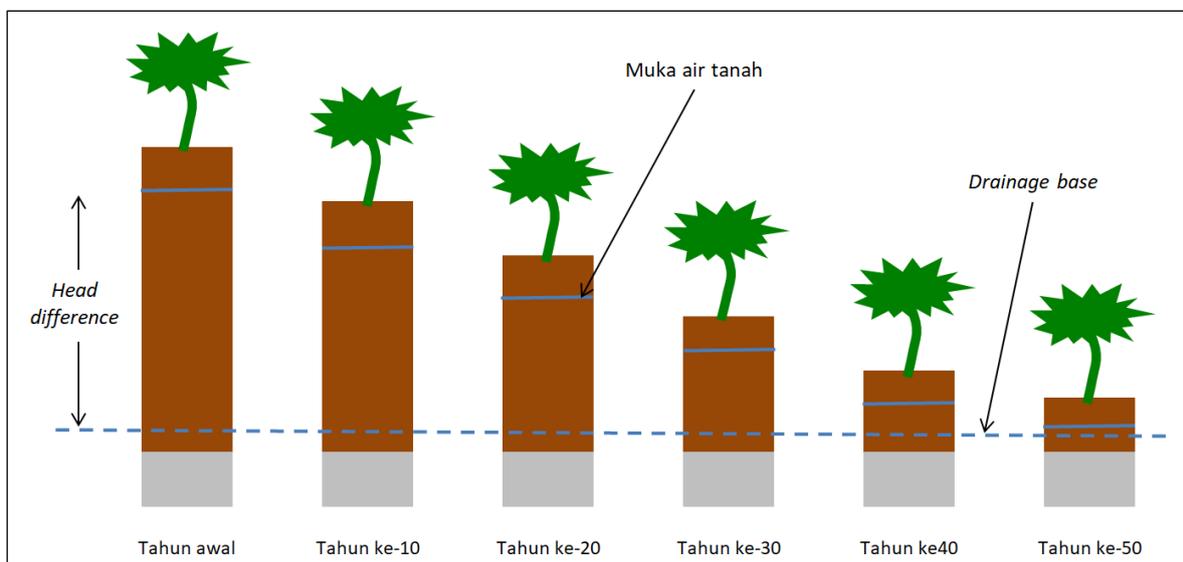
Gambar 14. Permukaan lahan dan muka air tanah tipikal di lahan gambut yang didrainase dengan dan tanpa dredging berkala.

Drainability limit

Drainability limit adalah kondisi batas dimana drainase secara gravitasi (disingkat drainase gravitasi) tidak mungkin lagi terjadi. Limit ini terdiri atas limit posisi (dalam ruang tiga dimensi) dan limit waktu. Limit posisi dimana drainase gravitasi tidak memungkinkan lagi disebut dengan *drainage base*, yaitu suatu bidang di permukaan bumi yang ketinggiannya di setiap titik di sepanjang bidang itu memiliki tangen sudut sebesar 0.0002 dihitung dari permukaan air sungai deposisi terdekat. Limit waktu dicapainya *drainage limit* disebut *drainage limit time* yaitu rentang waktu yang diperlukan lahan mengalami subsiden dari suatu elevasi ke *drainage base*.

Seperti diilustrasikan pada Gambar 15, dari pandangan *frog-view*, muka air tanah digambarkan sebagai garis biru utuh dan *drainage base* dengan garis biru putus-putus, yang merupakan suatu bidang imajiner dibawah permukaan gambut. Bila lahan tersebut didrainase dengan menerapkan *dredging* secara berkala permukaan lahan akan terus turun dan pada suatu saat, misalnya pada tahun ke-50, muka air tanah akan begitu dekat ke *drainage base*. Keadaan ini disebut 'mendekati *drainage limit*'. Pada ilustrasi tersebut *drainage limit time* adalah sekitar 55 tahun. *Drainage limit time* ini akan beragam tergantung pada laju subsiden dan ketinggian permukaan tanah awal relatif terhadap *drainage base*.

Pada saat mendekati *drainage limit* berbagai persoalan drainase akan muncul. Agar dapat mengalir, air membutuhkan beda tinggi (*head difference*) tertentu untuk setiap jarak alir tertentu. *Nisbah head difference* terhadap jarak alir ini disebut dengan head gradient. Selama mengalir air mengalami hambatan (*drag*) di permukaan tanah dan permukaan saluran yang menyebabkan kehilangan energi. Oleh sebab itu dibutuhkan *head gradient* minimum tertentu agar aliran tetap terjadi. Pada saat hampir tercapainya *drainage limit* slope lahan cenderung menjadi sangat datar. Air hujan yang jatuh di lahan tersebut yang berubah menjadi genangan tidak memiliki cukup *head gradient* untuk mengalir sehingga meningkatkan frekuensi, periode dan kedalaman banjir di musim hujan. Lahan yang mendekati *drainage limit* biasanya cenderung lebih rendah dari lahan disekitarnya dan dapat menjadi area depresi tempat berkumpulnya air dari lahan sekitar, yang juga memperparah persoalan banjir di musim hujan. Pada tahap yang paling akhir, bila *drainage limit* tercapai, atau terlewati, lahan tersebut akan mengalami genangan permanen.



Gambar 15. Ilustrasi *drainability limit*: Muka air tanah (garis biru utuh) dan *drainage base* (garis biru putus-putus). Elevasi permukaan lahan turun secara sinambung dan akhirnya muka air tanah menjadi menjadi dekat ke *drainage base*.

Bila ini terjadi lahan tidak mungkin lagi dikeringkan melalui drainase gravitasi konvensional, dan perlukan pemompaan mekanis. Ada sejumlah risiko/kerugian bila ini terjadi antara lain risiko ekonomi, lingkungan, politik dan hankam.

1. Risiko ekonomi

Risiko ekonomi yang timbul bila lahan mencapai atau mendekati genangan permanen adalah penurunan nilai guna lahan dan naiknya ongkos produksi atau penggunaan lahan. Lahan yang tergenang permanen memerlukan pemompaan mekanis agar dapat dimanfaatkan. Dengan curah hujan taksiran moderat sekitar 2000 mm/tahun, setiap hektar lahan gambut yang akan dipompa membutuhkan daya setidaknya-tidaknya sekitar 1944 kwh setiap tahun. Artinya, jika area perkebunan di lahan gambut Sumatra yang pada tahun 2016 mencapai lebih dari 1.2 juta hektar (Agus, *et al.*, 2016) tetap didrainase dan mencapai *drainage limit* maka daya yang diperlukan untuk pemompaan dimasa depan adalah sekitar 2333 GWH setiap tahunnya. Dan untuk ini diperlukan pembangkit listrik berkapasitas minimal 266 MW. Biaya ini belum termasuk biaya pembuatan tanggul-tanggul dan pemeliharaan. Pada akhirnya semua beban ini harus ditanggung oleh negara karena tata air pada kondisi seperti ini membutuhkan pengelolaan jaringan yang kompleks dan pendekatan terpadu. Disamping itu akan ada biaya-biaya tambahan perbaikan dan relokasi infrastruktur terdampak, kerusakan dan kehilangan lahan dan hak milik, meningkatnya biaya pengadaan air bersih dan biaya sarana produksi pertanian lainnya seperti pupuk dan pengapuran.

2. Risiko lingkungan

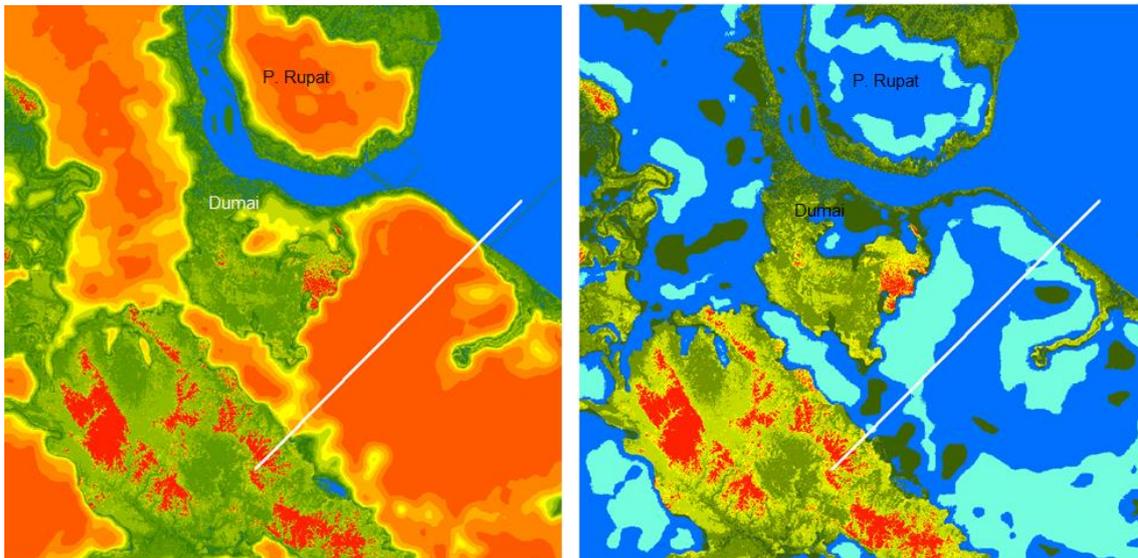
Sebagian besar lahan gambut Indonesia adalah gambut pantai. Bila *drainability limit* dicapai dan dilakukan pemompaan mekanis akan terjadi intrusi air asin atau payau di lokasi-lokasi yang berdekatan dengan garis pantai. Intrusi air asin atau payau dapat menimbulkan perubahan ekosistem, hilangnya habitat spesies air tawar dan sebagainya. Seperti telah disinggung sebelumnya lahan-lahan gambut Indonesia di dekat pesisir berkembang dari lahan mangrove, yang memiliki potensi besar mengandung lapisan pirit di dasarnya. Pada saat *drainage limit* tercapai atau terlewati potensi singkapan pirit ini sangat besar dan dapat berubah menjadi bencana lingkungan. Air yang berasal dari area singkapan pirit memiliki kemasaman yang tinggi dan bila memasuki tubuh air lainnya dapat merubah kondisi kimiawi setempat, meracuni berbagai makhluk air yang ada di dalamnya. Karena kemasaman yang sangat tinggi air singkapan pirit juga bersifat korosif dan mudah merusak benda-benda logam.

3. Risiko politik dan hankam

Area yang mencapai *drainability limit*, bila terus didrainase akhirnya dapat amblas sampai berada lebih rendah dari sungai dan laut. Untuk mencegah aliran lateral memasuki area ini diperlukan tanggul-tanggul penahan air, sehingga lokasi tersebut menjadi seperti cekungan. Air yang ada didalam cekungan ini harus dipompa terus menerus untuk menjaganya tetap bebas dari genangan. Sistem ini disebut polder, seperti dapat ditemukan di Belanda. Sistem polder ini merupakan sistem yang rawan karena kegagalan sistem pompa, curah hujan ekstrim, serangan teroris dan sebagainya dapat menimbulkan bencana banjir di dalam polder (lihat juga Gambar 16). Oleh sebab itu polder merupakan sebuah sistem yang riskan dan semakin riskan dengan adanya ancaman kenaikan muka air laut akibat perubahan iklim. Menciptakan polder di dalam sebuah wilayah negara menimbulkan beban secara ekonomi, politik dan hankam.



Gambar 16. Sebuah polder di Jijmegen, Belanda. Perhatikan air sungai (di sebelah kiri) yang lebih tinggi dari permukaan lahan (kanan). Tanggul-tanggul besar harus dibangun di sekeliling polder (sekaligus berfungsi sebagai jalan dalam gambar diatas) dan harus dirawat secara rutin. Jika terjadi kegagalan tanggul, air sungai dari kiri akan membanjiri polder di kanan.



Gambar 17. Ilustrasi hilangnya daratan karena tergenang saat drainage limit terlewati. Warna kuning dan orange pada gambar kiri menunjukkan lapisan gambut. Warna biru pada gambar kanan menunjukkan gambut telah mengalami subsiden dan tergenang permanen.



Penyekatan kanal-kanal di lahan gambut, merupakan upaya penting dalam mengembalikan tata kelola air gambut. (© Wetlands International Indonesia)

6. Untuk apa kajian *drainability limit* dan bagaimana melakukannya?

Kegunaan kajian *drainability limit*

Kajian *drainability limit* seyogyanya diperlukan dalam perencanaan dan evaluasi pengelolaan lahan gambut pada berbagai tingkat pengelolaan: nasional, sub nasional dan tingkat tapak. Pada tingkat nasional dan sub nasional hasil kajian *drainability* dapat memberikan panduan tambahan untuk perencanaan alokasi penggunaan ruang di lahan gambut dan durasi pemanfaatannya. Pada tingkat tapak hasil kajian ini dapat membantu dalam penilaian kelayakan usaha, proyek atau kegiatan lainnya yang berhubungan dengan pemanfaatan lahan gambut, serta untuk pembuatan business model. Pada semua tingkat pengelolaan, hasil kajian *drainability limit* berguna untuk mengevaluasi tingkat kerusakan yang telah terjadi, tingkat *sustainability* usaha saat ini, dan sebagai rambu-rambu kondisi-kondisi tertentu ekosistem gambut yang tidak boleh terlewati.

Kerangka besar yang mendasari kajian *drainability limit* memiliki sasaran: ‘jangan sampai lahan gambut yang ada saat ini menjadi polder di masa depan’. Karena bila tidak, akan terjadi perubahan kondisi yang tidak mungkin dipulihkan lagi. Bila lahan gambut yang didrainase direstorasi dan dikembalikan ke alam sebelum tercapainya *drainability limit* ada kemungkinan ekosistem gambut tersebut akan pulih walaupun tidak 100% dan memerlukan jangka waktu yang sangat lama. Tetapi bila ia direstorasi dan dikembalikan ke alam setelah mencapai atau melewati *drainability limit*, peluang pemulihan (meskipun menggunakan pola paludikultur) akan sangat kecil bahkan hampir mustahil.

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses pembentukan lahan gambut pesisir memerlukan kondisi geologi dan iklim yang unik di masa lalu dalam rentang waktu ribuan tahun, yang kecil kemungkinannya untuk dapat terulang di masa ini. Lahan gambut yang terlanjur mencapai *drainability limit* bila direstorasi dan dikembalikan ke alam, kecil sekali kemungkinannya untuk berkembang kembali menjadi kubah gambut. Bila lokasi tersebut berada di area yang terpengaruh pasang surut ada kemungkinan air payau akan masuk jauh ke daratan dan menyebabkan suksesi vegetasi HRG sulit terjadi. Oleh karena itu, *drainability limit* merupakan suatu *point-of-no-return* yang menandai dimulainya pemanfaatan lahan biaya tinggi dan restorasi/pemulihan ekosistem gambut yang hampir mustahil.

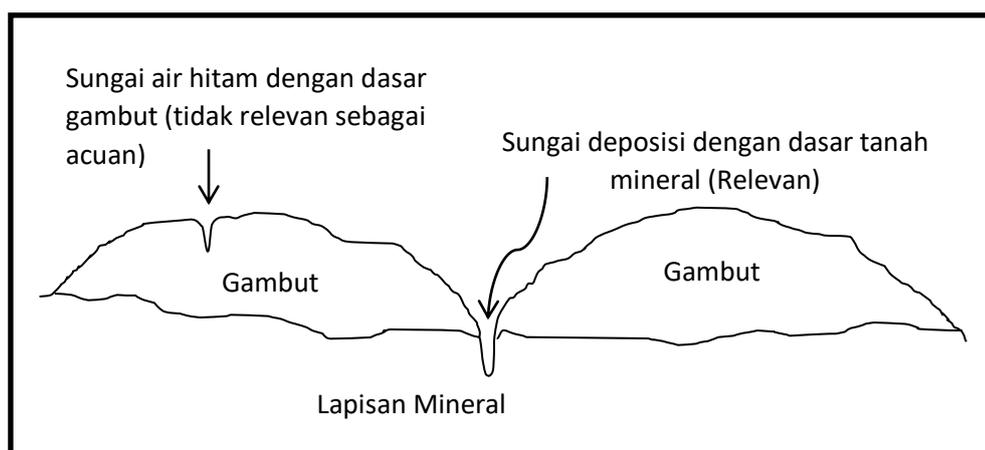
Metode kajian *drainability limit*

Kajian *drainability limit* dilakukan melalui dua tahap. Pada tahap pertama dipetakan *drainage base* di lokasi yang dikaji. Pada tahap kedua dipetakan *drainage limit time* untuk lokasi tersebut. Pemetaan *drainage base* dilakukan dengan langkah-langkah berikut:

Pemetaan *drainage base*

1. Delineasi tubuh air acuan

Tubuh air acuan adalah semua tubuh air alami berupa sungai deposisi, danau, dan garis pantai di dalam dan sekitar lokasi yang dikaji. Boundary kajian idealnya adalah suatu landscape dengan batas-batas alami, karena dengan demikian besar kemungkinan semua sungai yang relevan akan tercakup didalamnya. Sungai erosif dan sungai air hitam (sungai air gambut atau *blackwater stream*) tidak dapat dijadikan sebagai tubuh air acuan karena secara kerekayasaan sungai-sungai tersebut masih dapat diperdalam oleh manusia. Dalam kajian *drainability limit*, tubuh air acuan dianggap sebagai tempat terendah pembuangan air terakhir dari area yang dikaji yang tidak mungkin lagi lebih rendah daripada itu. Jika suatu sungai masih dapat diperdalam oleh manusia, kendala drainase dimasa depan sebenarnya masih dapat diatasi dengan melakukan *dredging* di sungai tersebut, sehingga kendala yang terjadi bukan merupakan *drainability limit* yang sebenarnya. Lihat juga gambar 18 sebagai ilustrasi.



Gambar 18. Ilustrasi posisi sungai air hitam terhadap sungai deposisi: sungai air hitam berada posisi lebih tinggi daripada sungai deposisi yang menjadi sungai utamanya.

Sungai erosif tidak dapat dijadikan acuan karena cenderung berada di area berlereng lebih curam dan lokasi yang lebih tinggi dari lahan gambut. Sungai air hitam juga bukan merupakan acuan karena dasar saluran berada di atas lapisan gambut dan tidak berada di posisi terendah yang mungkin didapat di *landscape* tersebut. Bahkan sudah menjadi praktek umum dalam rekayasa saluran di lahan gambut bahwa jika terdapat sungai air hitam di dalam konsesi, sungai tersebut dapat diperdalam dan diperlurus untuk dijadikan saluran primer.

Sungai deposisi sebaliknya merupakan sungai dengan elevasi dasar saluran yang relatif stabil. Sungai ini ditandai oleh banyak meander yang merupakan suatu sistem homeostatis alam dalam mencapai kesetimbangan proses erosi-deposisi. Jika manusia mencoba memperdalam dasar saluran sungai-sungai seperti ini kecepatan aliran akan berkurang dan sedimentasi akan meningkat. Dengan demikian secara berangsur-angsur dasar saluran yang diperdalam akan mengalami pendangkalan dan kembali ke elevasi semula sehingga tidak berdampak pada elevasi muka air saluran dalam jangka panjang.

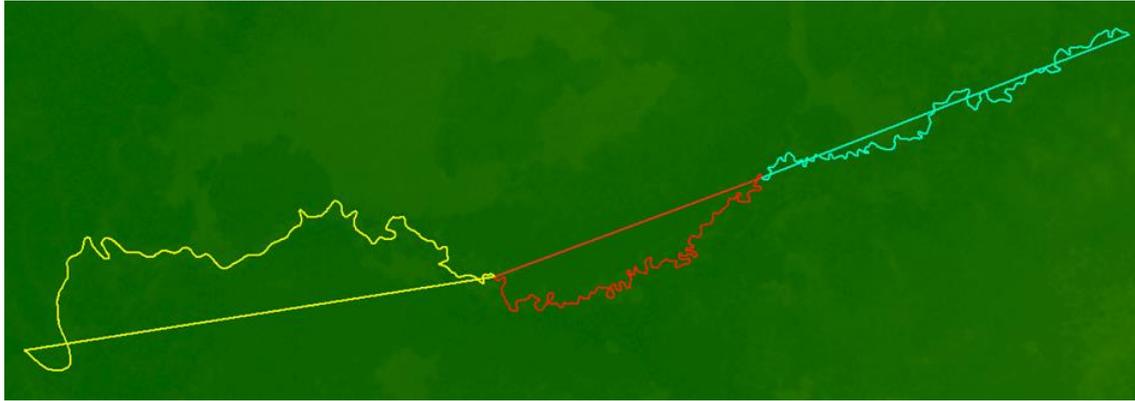
Untuk mengidentifikasi sungai erosif dan sungai deposisi perlu diperhatikan morfologi sungai yang dimaksud. Salah satu fitur yang dapat digunakan sebagai pembeda adalah parameter sinusitas (*sinuosity*) sungai, yaitu nisbah antara panjang aliran (*stream length*) terhadap panjang lembah (*valley length*). Seperti disajikan pada gambar 19, panjang aliran adalah panjang sungai diantara dua titik mengikuti garis aliran sungai sebenarnya. Panjang lembah adalah jarak lurus diantara dua titik pada garis aliran sungai. Dengan demikian sinusitas sungai (K) dapat dihitung sebagai (Leopold dan Wolman, 1960).

$$K = \frac{L_S}{L_R}$$

Dimana

- K : Sinusitas sungai
- L_S : Panjang aliran sungai
- L_R : Panjang lembah sungai

Suatu sungai dikategorikan sebagai sungai deposisi bila angka sinusitasnya bernilai ≥ 1.5 dan dikategorikan sebagai sungai erosif bila sinusitas ≤ 1.1 . Sungai-sungai dengan sinusitas antara 1.1 dan 1.5 dikategorikan sebagai sungai transisi (Leopold dan Wolman, 1960).



Gambar 19. Ilustrasi cara penghitungan sinusitas sungai pada tiga segmen: A (cyan), B (merah) dan C (kuning). Panjang sungai diperlihatkan oleh garis berliku, panjang lembah diperlihatkan oleh garis lurus. Hasil analisis sinusitas diberikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan hasil analisis sinusitas sungai ilustrasi yang diberikan pada gambar 19.

Segmen	Panjang aliran (m)	Panjang lembah (m)	Sinusitas	Tipe
A (cyan)	19000	11679	1.63	Deposisi
B (merah)	19000	8464	2.24	Deposisi
C (kuning)	24848	14099	1.76	Deposisi

2. Memetakan elevasi permukaan air pada tubuh air acuan

Elevasi permukaan air yang digunakan dapat beragam tergantung pada tujuan dan keragaman kajian *drainability*. Elevasi tubuh air berfluktuasi secara periodik: ada elevasi pasang tinggi, pasang rendah, median, elevasi musim hujan, musim kemarau, dan sebagainya. Jika yang dipilih adalah elevasi pasang tinggi maka peta *drainage base* yang dihasilkan adalah *drainage base* pada saat pasang tinggi. Hal senada berlaku untuk kasus pasang rendah, median, musim kemarau dan musim hujan. Ada implikasi penting dari pemilihan kategori elevasi tubuh air yang digunakan. Jika seseorang memilih elevasi tubuh air pasang rendah sebagai acuan maka peta *drainage base* yang dihasilkan akan cenderung lebih rendah pula. Jika lahan tersebut mengalami subsiden sampai batas *drainability limit* di masa depan maka lahan tersebut besar sekali berisiko mengalami *backwater* air asin atau payau melalui *overland flow*. Jika seseorang memilih elevasi pasang tinggi sebagai acuan akan diperoleh elevasi *safeguard* yang lebih baik dalam peta *drainage base* yang dihasilkan, yang lebih berpihak pada aspek kelestarian. Pada praktek yang lebih bersifat kompromi elevasi permukaan pasang surut air laut rata-rata dapat dijadikan pilihan acuan.

Elevasi permukaan air pada tubuh air acuan dapat dipetakan dari data yang ada (baik hasil rekaman langsung, atau pun sumber-sumber sekunder) di beberapa titik yang kemudian dapat di-interpolasi sepanjang garis sungai. Interpolasi bertahap dengan memperhatikan gradasi lereng sepanjang garis aliran sangat dianjurkan. Hal ini dapat dilakukan dengan membagi aliran menjadi segmen-segmen mengikuti keragaman lereng saluran yang ada (Gambar 20). Segmen-segmen yang diperoleh biasanya cukup panjang, dengan panjang lembah 1 – 20 km. Interpolasi lereng sungai diantara dua titik ujung segmen dilakukan dengan persamaan:

$$\alpha_j = \frac{h_{2,j} - h_{1,j}}{s_j}$$

Dimana

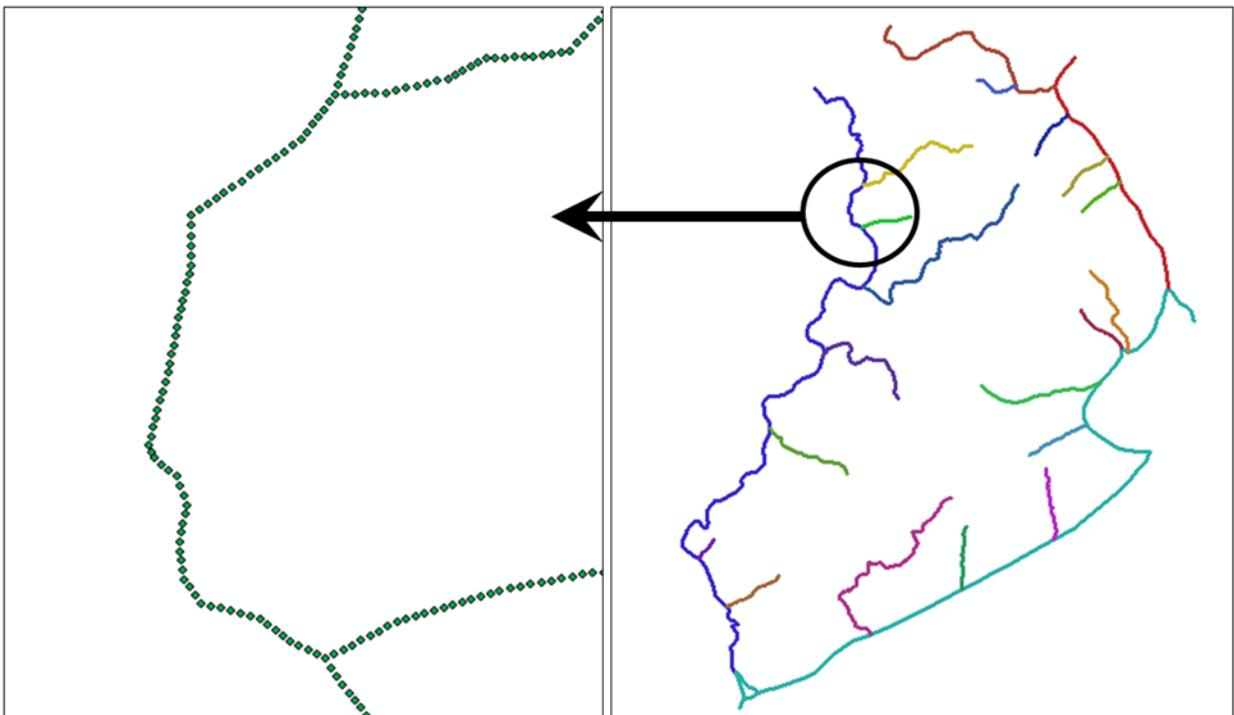
- α : Lereng saluran segmen sungai (m/m)
- $h_{1,j}$: Elevasi muka saluran pada titik hilir segmen j (m)
- $h_{2,j}$: Elevasi muka saluran pada titik hulu segmen j (m)
- s : panjang segmen j (m)
- j : Indeks posisi segmen dihitung dari hilir ke hulu

Interpolasi elevasi tubuh air sungai dapat dilakukan dengan membagi setiap segmen sungai kedalam partisi yang lebih kecil misalnya berukuran 50 meter atau 100 meter. Setiap partisi dapat diwakili oleh suatu node, yaitu centroid partisi yang bersangkutan (Gambar 20). Elevasi muka air pada setiap node dan segmen dapat dikalkulasi dengan hitungan berantai dari hilir ke hulu sebagai berikut:

$$h_{i,j} = h_{i-1,j} + \alpha_j \times \Delta X$$

Dimana

- h : Elevasi muka air pada node (m)
- α : Lereng saluran segmen sungai (m/m)
- ΔX : Jarak antar node misalnya 50 m atau 100m (m)
- i : Indeks posisi node dihitung dari hilir ke hulu
- j : Indeks posisi segmen dihitung dari hilir ke hulu



Gambar 20. Contoh pembagian tubuh air acuan kedalam segmen yang berbeda berdasarkan lereng saluran. Warna berbeda menunjukkan lereng yang berbeda (kanan). Semua segmen kemudian dipartisi dan diwakili oleh node berjarak 100 meter, diperlihatkan sebagian sebagai inzet (kiri).

Contoh perhitungan 1

Andaikan sebuah tubuh air acuan sepanjang 62906 meter di area yang dikaji mengalir langsung ke laut. Dengan demikian dapat diketahui bahwa elevasi muka air rata-rata di muara sungai adalah 0 m-dpl. Andaikan juga di bagian paling hulu sungai yang dimaksud diperoleh data tinggi muka air rata-rata 1.5 m-dpl. Dari data ini elevasi muka air sepanjang garis sungai di antara kedua ujung dapat di-interpolasi. Pertama, perlu dihitung slope sungai diantara kedua ujung.

$$Slope = \frac{1.5 \text{ m} - 0 \text{ m}}{62906 \text{ m}} = 0.0000238$$

Garis tubuh air acuan ini kemudian dipartisi menjadi nodes dengan interval tertentu, misalnya 25 meter. Berdasarkan data sebelumnya dapat diketahui bahwa pada node pertama yang berada paling hilir di muara elevasi muka air rata-rata adalah 0 m-dpl. Dengan demikian selanjutnya dapat dilakukan perhitungan berantai terhadap elevasi muka air dari hilir ke hulu, node per node, seperti berikut:

Node 0 = 0

Node 1 = $0 + 0.0000238 * 25 = 0.000596$

Node 2 = $0.000596 + 0.0000238 * 25 = 0.001192$

Node 2 = $0.001192 + 0.0000238 * 25 = 0.001788$

dan seterusnya...

3. Kalkulasi *drainage base* pada titik-titik perwakilan

Titik-titik perwakilan adalah sebaran titik di dalam area yang dikaji yang berada di dalam ruang diantara garis tubuh air acuan yang digunakan sebagai perwakilan untuk mengkalkulasi elevasi *drainage base* pada lokasi titik tersebut. Titik-titik ini dapat dibuat sebagai sebaran teratur (*grid*) atau acak. Jumlah titik yang digunakan disesuaikan dengan sumber daya dan tingkat kerincian yang diinginkan. Dianjurkan agar minimum bounding geometry rata-rata dari pertetanggaan (*neighborhood*) terkecil sebaran titik berukuran tidak lebih dari 10% ukuran area kajian diantara garis-garis sungai acuan dimana ia berada (lihat juga gambar 21).

Setelah titik-titik perwakilan ditempatkan selanjutnya dapat dilakukan kalkulasi jarak setiap titik ke tubuh air acuan terdekat. Karena setiap partisi tubuh air acuan telah diwakili oleh node, maka jarak yang dihitung adalah jarak ke node terdekat serta identitas (ID) node tersebut. Proses ini dapat dilakukan dengan bantuan berbagai perangkat lunak yang tersedia. Selanjutnya nilai *drainage base* untuk setiap titik perwakilan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

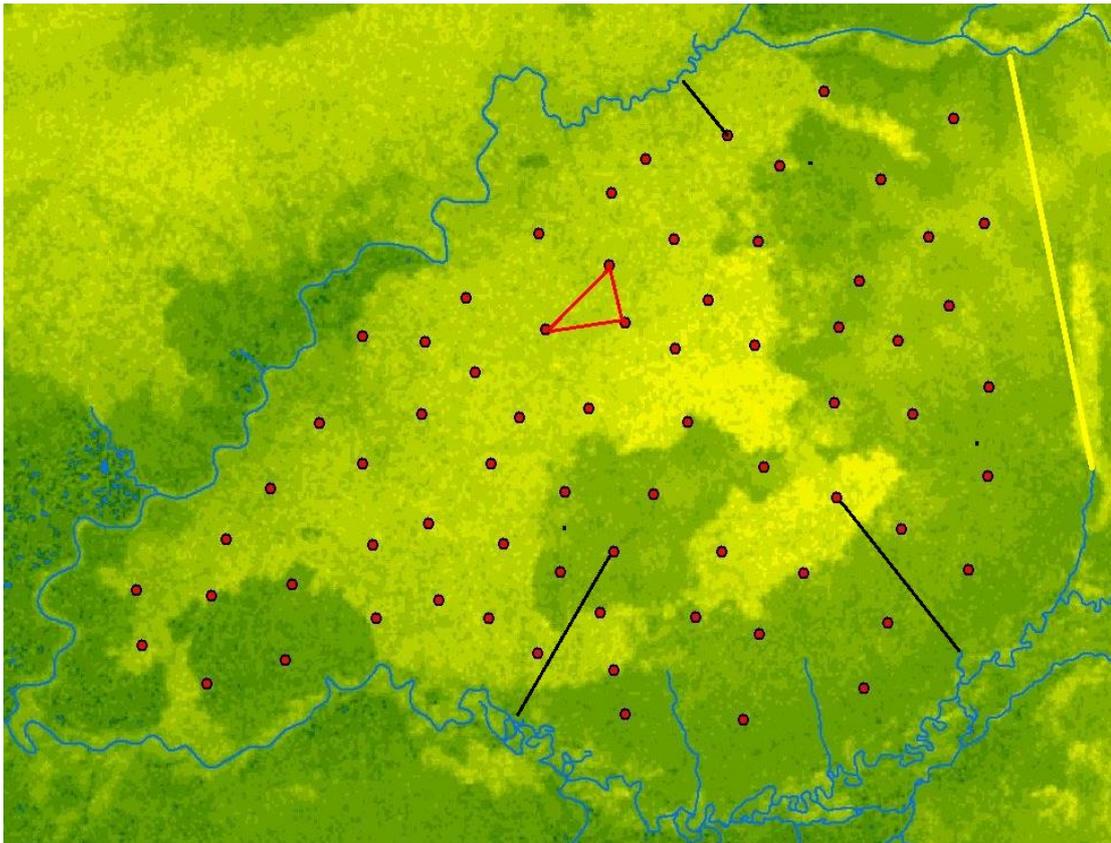
$$Z_{DB} = h_{NWL} + 0.0002X$$

Dimana

Z_{BD} : Nilai *drainage base* pada suatu titik (m-dpl)

h_{NWL} : Elevasi muka air pada node tubuh air acuan terdekat (m-dpl)

X : Jarak ke node tubuh acuan terdekat (m)



Gambar 21. Ilustrasi penempatan titik-titik perwakilan secara acak (titik merah) diantara sungai-sungai acuan (garis biru). Salah satu minimum bounding geometry (MBG) pertetanggan titik perwakilan diperlihatkan sebagai segitiga merah. Area kajian berada diantara garis biru dan garis kuning. Rata-rata luas MBG kurang dari 10% luas area kajian. Contoh jarak titik ke tubuh air acuan terdekat diperlihatkan dalam garis hitam.

Contoh perhitungan 2

Berdasarkan contoh perhitungan 1, andaikan diketahui node terdekat dari suatu titik A yang dianalisis adalah node nomor 883 dan jarak ke node tersebut adalah 2100 meter. Kemudian diketahui bahwa elevasi muka air rata-rata terhitung pada node tersebut adalah 0.53 m-dpl. Maka elevasi drainage base pada titik tersebut dapat dihitung

$$Z_{DB} = 0.53 \text{ m} + 0.0002 \times 2100 \text{ m}$$

$$Z_{DB} = 0.95 \text{ m}$$

Dengan demikian hasil analisis menunjukkan bahwa elevasi drainage base pada titik A adalah 0.95 m diatas permukaan laut.

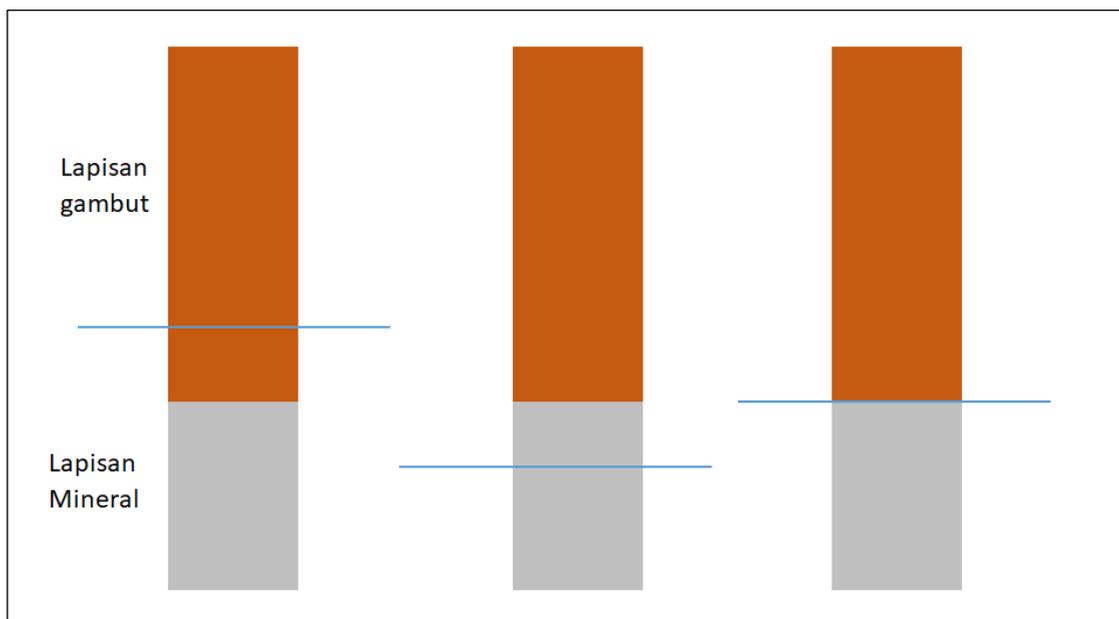
4. Pembuatan peta *drainage base*

Peta *drainage base* dapat dibuat dengan menerapkan prosedur analisis geostatistika (*kriging*) di perangkat lunak yang sesuai. Input untuk analisis geostatistika adalah nilai elevasi *drainage base* yang dihitung di titik-titik perwakilan digabungkan dengan elevasi muka air pada node-node tubuh air acuan. Produk final dari proses ini berbentuk raster. Analisis geostatistika merupakan prosedur yang umum dipakai dalam berbagai analisis spasial dan pembahasannya berada diluar ruang lingkup dokumen ini. Panduan mengenai teknik ini dapat diperoleh dari berbagai sumber misalnya di website ESRI (ESRI, 2018) atau dari buku-buku ajar sistem informasi geografis dan kartografi.

Pemetaan *drainage limit time*

1. Menentukan posisi relatif *basal contact* gambut terhadap *drainage base*

Posisi relatif *drainage base* terhadap *basal contact* gambut (atau dasar gambut, yaitu batas antara lapisan mineral dengan lapisan gambut) perlu ditentukan sebelum menghitung *drainage limit time*. *Basal contact* gambut dapat berada diatas, dibawah atau sejajar dengan *drainage base* (Gambar 22). Oleh karena itu dalam perhitungan ini diperlukan peta elevasi permukaan lahan (DEM) dan peta ketebalan gambut.



Gambar 22. Posisi relatif *drainage base* terhadap *basal contact* gambut: *drainage base* berada di atas *basal contact* (kiri), di bawah (tengah) dan sejajar (kanan).

Elevasi *basal contact* gambut dapat dihitung sebagai berikut

$$Z_{BC} = Z_{top} - P$$

Dimana

Z_{BC} : Elevasi *basal contact* gambut (m-dpl)

Z_{top} : Elevasi permukaan lahan, dapat diperoleh dari DEM (m-dpl)

P : Ketebalan gambut (m)

Dari sini akan diperoleh acuan dalam penghitungan jarak ke dasar (*depth to base*, atau DTB). Jarak ke dasar adalah jarak vertikal antara permukaan lahan dengan *drainage base* atau *basal contact* gambut, manapun yang lebih tinggi. Bila posisi *drainage base* lebih tinggi, atau berada diatas *basal contact* gambut maka DTB dihitung sebagai berikut:

$$\mathbf{Bila \quad Z_{DB} > Z_{BC}}$$

$$\mathbf{Maka \quad DTB = Z_{top} - Z_{DB}}$$

Dimana

DTB : Jarak ke dasar atau *depth to base* (m)

Z_{BC} : Elevasi *basal contact* gambut (m-dpl)

Z_{top} : Elevasi permukaan lahan, yang diperoleh dari DEM (m-dpl)

Z_{DB} : Elevasi *drainage base* (m-dpl)

Bila posisi *drainage base* lebih rendah atau sejajar dengan *basal contact* gambut maka DTB dihitung sebagai berikut:

$$\mathbf{Bila \quad Z_{DB} \leq Z_{BC}}$$

$$\mathbf{Maka \quad DTB = P}$$

Dimana

P : Ketebalan gambut (m)

Contoh perhitungan 3

Berdasarkan contoh perhitungan 2, bila diketahui elevasi permukaan lahan pada titik A tersebut 4.2 meter diatas permukaan laut dan ketebalan gambut 2.8 meter, maka DTB dapat diperkirakan dengan langkah-langkah berikut. Pertama perlu dihitung elevasi *basal contact* gambut:

$$\mathbf{Z_{BC} = 4.2 \text{ m} - 2.8 \text{ m}}$$

$$\mathbf{Z_{BC} = 1.4 \text{ m}}$$

Sehingga diketahui bahwa *basal contact* gambut pada titik A berada pada 1.4 meter diatas permukaan laut. Ini jelas lebih tinggi daripada elevasi *drainage base* di titik tersebut, yang berada pada 0.95 meter diatas permukaan laut (lihat contoh perhitungan 2). Oleh karena itu DTB diwakili oleh ketebalan gambut

$$\mathbf{DTB = P}$$

$$\mathbf{DTB = 2.8 \text{ m}}$$

2. Menentukan laju subsiden

Laju subsiden dapat ditentukan berdasarkan *land use* sekarang atau berdasarkan skenario *land use* yang akan dicobakan atau kombinasi keduanya. Data laju subsiden dapat diperoleh dari pengukuran langsung atau sumber-sumber sekunder. Misalkan suatu area kajian pada saat ini merupakan area terdrainase dengan laju subsiden 6 cm/tahun, kemudian diskenariokan area tersebut akan direstorasi secara bertahap setelah 20 tahun ke depan, sehingga laju subsiden berkurang menjadi 3 cm/tahun; dan subsiden benar-benar dapat berhenti setelah 50 tahun dari sekarang; maka data subsiden yang akan digunakan adalah: 6 cm/tahun selama 20 tahun pertama, 3 cm/tahun pada tahun 20 – 50 dan 0 cm/tahun setelah tahun ke 50.

3. Memetakan *drainage limit time*

Drainage limit time dapat dipetakan berdasarkan jarak ke dasar (DTB) dan laju subsiden:

$$DLT = \frac{DTB}{S}$$

Dimana

DLT : *Drainage limit time* (tahun)

DTB : *Depth to base*, jarak ke dasar (m)

S : Laju subsiden (m/tahun). Perhatikan bahwa laju subsiden harus dikonversi dari satuan yang biasa digunakan (cm/tahun) ke meter/tahun

Semua perhitungan diatas dapat dilakukan secara spasial sehingga output yang dihasilkan adalah peta *drainage limit time* dalam format raster.

Contoh perhitungan 4

Berdasarkan contoh perhitungan 3 dengan DTB sebesar 2.8 meter, berapa *drainage limit time* pada titik A tersebut bila dikonversi menjadi lahan budidaya dengan skenario berikut?

- Perkebunan kelapa sawit drainase dalam dengan laju subsiden 5 cm/tahun
- Budidaya tanaman pangan drainase dangkal dengan laju subsiden 2 cm/tahun

Penyelesaian

- Untuk skenario kelapa sawit:

$$DLT = \frac{2.8 \text{ m}}{\left(\frac{5}{100}\right) \frac{\text{m}}{\text{th}}}$$

$$DLT = 56 \text{ tahun}$$

- Untuk skenario budidaya tanaman pangan drainase dangkal:

$$DLT = \frac{2.8 \text{ m}}{\left(\frac{2}{100}\right) \frac{\text{m}}{\text{th}}}$$

$$DLT = 140 \text{ tahun}$$

Penggunaan hasil kajian *drainability limit* dalam perencanaan dan pengambilan keputusan

Hasil kajian *drainability limit* yang terpenting adalah peta-peta yang terdiri dari:

- (1) peta elevasi *drainage base*
- (2) peta jarak ke dasar
- (3) peta *drainage limit time*

Peta-peta ini dapat digunakan untuk perencanaan pengelolaan lahan dan bantuan dalam pengambilan keputusan. Misalnya, membandingkan elevasi *drainage base* dengan kedalaman pirit akan memberikan gambaran tingkat resiko singkapan pirit di masa depan. Peta jarak ke dasar memberikan gambaran ruang vertikal yang masih tersedia jika penggunaan lahan menyebabkan terjadinya subsiden. Peta *drainage limit time* menggambarkan berapa lama waktu yang masih tersedia bagi penggunaan lahan dengan laju subsiden tertentu sebelum *drainage limit* tercapai.

Contoh perhitungan 5

Berdasarkan contoh perhitungan 4 pada skenario kelapa sawit, andaikan suatu standar sertifikasi menetapkan suatu persyaratan bahwa pelaku usaha yang mendrainase lahan gambut harus menghentikan drainase sebelum mencapai kedalaman *safegurad* tertentu, yaitu saat elevasi lahan sudah berada 1 meter di atas *drainage base*. Berapa kali siklus tanam tipikal (25 tahun) usaha di lahan titik A tersebut dapat dilakukan?

Penyelesaian

Pertama perlu dihitung kedalaman subsiden yang diperbolehkan (D_{batas}) berdasarkan kedalaman *safegurad* (d_{safe}) yaitu:

$$D_{batas} = DTB - d_{safe}$$
$$D_{batas} = 2.8 \text{ m} - 1 \text{ m} = 1.8 \text{ m}$$

Selanjutnya periode tanam yang diperbolehkan (T) dapat dihitung:

$$T = \frac{D_{batas}}{S}$$
$$T = \frac{1.8 \text{ m}}{\left(\frac{5}{100}\right) \frac{\text{m}}{\text{th}}}$$
$$T = 36 \text{ tahun}$$

Dari sini diketahui bahwa, menurut standar sertifikasi tersebut, di lahan ini hanya diperbolehkan satu siklus tanam; karena jika dilakukan dua siklus (50 tahun) akan melanggar periode tanam maksimum yang diperbolehkan, yaitu 36 tahun. Dari sini pengelola lahan dapat juga merencanakan *phase out* di masa depan yaitu kapan (sebelum 36 tahun) dan apa tindakan *phase out* yang diperlukan. Pengelola lahan juga dapat memperhitungkan apakah investasi selama periode maksimum 36 tahun tersebut layak atau tidak untuk dilakukan.



Persemaian bibit-bibit tanaman rawa gambut, adalah salah satu upaya untuk merehabilitasi lahan gambut yang rusak. (© Wetlands International Indonesia)

7. Siapa yang seharusnya melakukan kajian *drainability limit*?

Kajian *drainability limit* sewajarnya dilakukan oleh semua pihak yang berkepentingan dalam pengelolaan lahan gambut baik pada tingkat nasional, sub-nasional dan tingkat tapak. Pada tingkat nasional dan sub nasional pemerintah berkepentingan untuk memperoleh acuan dalam pengembangan dan penerapan kebijakan di lahan gambut, serta memantau dan mengevaluasi status *sustainability land use* yang sudah ada di lahan gambut saat ini, misalnya di lokasi izin-izin yang sudah dikeluarkan, di lokasi yang di-okupasi masyarakat, dan sebagainya. Di tingkat tapak sewajarnya pelaku *land use* mengevaluasi diri untuk melihat tingkat *sustainability* lingkungan dan usaha yang sudah dilakukan, terutama bagi pelaku-pelaku usaha. Dan yang terpenting sebelum suatu usaha yang dapat menimbulkan subsidi dilakukan diperlukan kajian *drainability limit* untuk memproyeksikan dampak di masa depan dan durasi usaha yang wajar (*fair duration*). Pada prinsipnya durasi usaha jangan melebihi *drainage limit time* dengan menyisakan cukup ruang waktu sebagai *safeguard*.

Di dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 71 tahun 2014 jo. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 57 tahun 2016 telah digariskan bahwa perlindungan dan pengelolaan ekosistem gambut dilakukan pada satuan-satuan wilayah pengelolaan berupa kesatuan hidrologis gambut (KHG). Unit-unit pengelolaan ini diupayakan mencapai keserasian dengan kesatuan sistem dan keruangan alami lahan gambut. Walaupun demikian, dengan dibagi-baginya wilayah KHG kedalam zona-zona dengan fungsi lindung dan fungsi budidaya, mau tidak mau akan terdapat area-area yang telah dan akan terus mengalami subsidi di dalam berbagai KHG. Area dengan fungsi lindung yang berbatasan langsung dengan area yang telah atau akan di dirainase atau dideforestasi akan ikut terkena pengaruh rambatan yang berakibat pada subsidi dan emisi GRK. Hal ini tidak terlepas dari adanya konektivitas hidrologis di dalam satu kesatuan kubah atau area tangkapan air.

Oleh sebab itu, untuk meminimalisir dampak yang telah disebutkan diatas, serta untuk memaksimalkan kelestarian lahan gambut Indonesia perlu dicermati dan dipertimbangkan langkah-langkah berikut oleh berbagai pihak:

1. Lahan gambut dengan fungsi lindung yang berbatasan langsung dengan area yang didrainase memerlukan area penyangga hidrologis dengan ukuran minimum yang sesuai, tergantung pada karakteristik hidrolika dan mekanika tanah setempat dan kedalaman *drainage base*. Dalam hal ini diperlukan kajian *drainability limit* oleh pengelola area fungsi lindung tersebut bersama-sama dengan pengelola area yang didrainase bersangkutan;
2. Lahan gambut yang telah terlanjur didrainase seyogyanya memperoleh perencanaan *phase out*, baik *phase out* lokasi maupun *phase out* komoditi berdasarkan hasil kajian *drainability limit*. Dalam hal ini tanggung jawab melakukan kajian dapat dibebankan ke tangan pengelola lahan bersangkutan atau oleh negara selaku pengawas;
3. Perencanaan tata ruang lahan gambut, terutama yang menyangkut penggunaan lahan yang dapat menyebabkan subsiden, seyogyanya perlu memperhatikan aspek *drainability limit*; karena hal ini menyangkut keberlangsungan penggunaan lahan, kelayakan dan potensi dampak. Dalam hal ini tanggung jawab kajian dapat dibebankan kepada pemerintah.

Referensi

- Agus, F., M. Anda, A. Jamil, dan Masganti. 2016. *Lahan gambut Indonesia: pembentukan, karakteristik, dan potensi mendukung ketahanan pangan (Edisi Revisi)*. IAARD Press. Jakarta.
- 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.
- Andriese, J.P. 1988. *Nature and Management of Tropical Peat Soils*. FAO Soils Bulletin 59, Rome.
- Eggelsmann, R.F. 1976. *Peat consumption under influence of climate, soil condition and utilization*. Proc. 5th Int. Peat Congr., Poznan. Poland 1, 233–247.
- ESRI. 2018. <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/introduction-to-the-arcgis-geostatistical-analyst-tutorial.htm>
- Furukawa, H. 1994. *Coastal Wetlands of Indonesia: Environment, subsistence, and exploitation*. Translated by Peter Hawkes. Kyoto University Press, Japan.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G. 1960. *River meanders*. Bull. Geol. Soc. Am. 71:769–794.
- 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.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 71 tahun 2014 Tentang Perlindungan dan Pengelolaan Ekosistem Gambut.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 57 tahun 2016 Tentang Perubahan atas Peraturan Pemerintah Nomor 71 Tahun 2014 Tentang Perlindungan dan Pengelolaan Ekosistem Gambut.
- Rais, D.S. 2016. *Subsidence: some practical-quantitative aspects of subsidence projection in drained peatlands*. E-Book. Rakuten-Kobo Publishing. ISBN 1230001020144
- Rochmayanto et al. 2014. *Cadangan Karbon pada Berbagai Tipe Hutan dan Jenis Tanaman di Indonesia (Seri 2)*. Kanisius. Yogyakarta.
- Schothorst, C.J. 1977. *Subsidence of low moor peat soils in the western Netherlands*. Geoderma 17, 265–291.
- Soil Survey Staff. 1975. *Soil Taxonomy : A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. United States Department of Agriculture.

Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy : A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. United States Department of Agriculture.

Terzaghi, K.V. 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York p. 510.

Vernimmen, R., A. Hooijer, and D. Mulyadi. 2014. *Environmental impacts of the Lumut and Badas pipeline canals on the BAP peatland project area in West Brunei. First findings after 9 months of field monitoring. Report by Deltares for Wetlands International*. Project Title: Brunei Shell Joint Venture - Biodiversity Action Plan. Final Report – April 2014. Wetlands International - Deltares.

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.



 Wetlands International

 @WetlandsInt

 Wetlands International



PARTNERS FOR RESILIENCE | INDONESIA



Wetlands
INTERNATIONAL