

NERACA HARA DAN KARBON DALAM SISTEM AGROFORESTRI

Kurniatun Hairiah, Sri Rahayu Utami, Betha Lusiana dan Meine van Noordwijk

TUJUAN

- Mempelajari proses-proses yang terlibat dalam perbaikan ketersediaan bahan organik dan hara tanah akibat penanaman pohon pada sistem agroforestri.

1. Konsep dasar siklus hara dalam sistem agroforestri

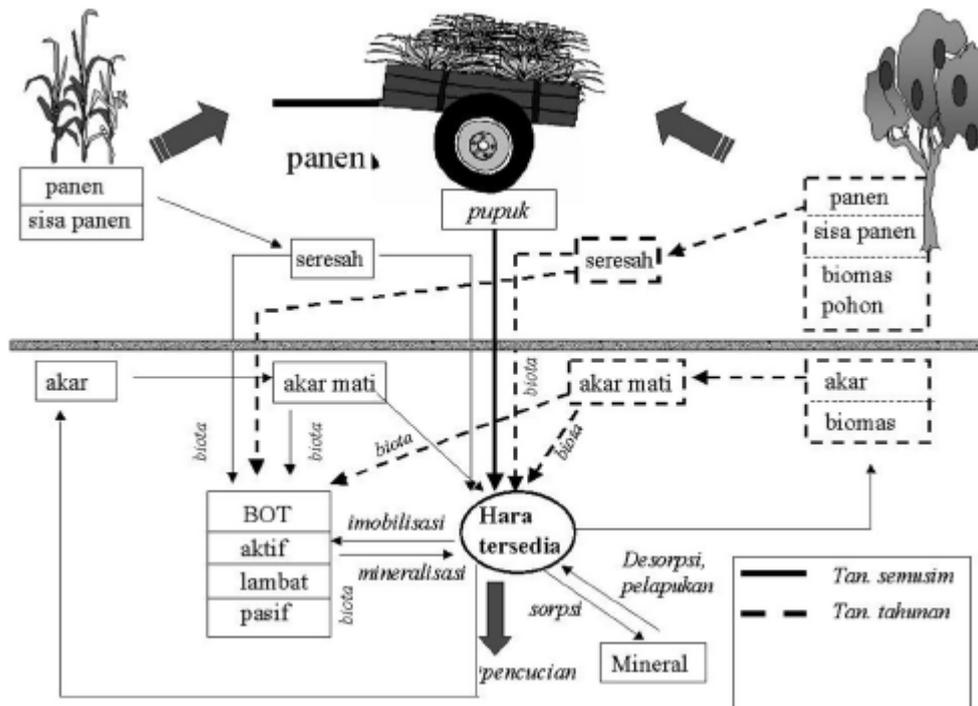
1.1 Siklus hara

Di dalam ekosistem, hubungan tanah, tanaman, hara dan air merupakan bagian yang paling dinamis. Tanaman menyerap hara dan air dari dalam tanah untuk dipergunakan dalam proses-proses metabolisme dalam tubuhnya. Sebaliknya tanaman memberikan masukan bahan organik melalui serasah yang tertimbun di permukaan tanah berupa daun dan ranting serta cabang yang rontok. Bagian akar tanaman memberikan masukan bahan organik melalui akar-akar dan tudung akar yang mati serta dari eksudasi akar. Di dalam sistem agroforestri sederhana, misalnya sistem budidaya pagar, pemangkasan cabang dan ranting tanaman pagar memberikan masukan bahan organik tambahan. Bahan organik yang ada di permukaan tanah ini dan bahan organik yang telah ada di dalam tanah selanjutnya akan mengalami dekomposisi dan mineralisasi dan melepaskan hara tersedia ke dalam tanah. Istilah siklus hara ini di dalam sistem agroforestri sering diartikan sebagai penyediaan hara secara terus menerus (kontinyu) bila ditinjau dari konteks hubungan tanaman-tanah. Dalam konteks yang lebih luas, penyediaan hara secara kontinyu ini melibatkan juga masukan dari hasil pelapukan mineral tanah, aktivitas biota, dan transformasi lain yang ada di biosfir, lithosfir dan hidrosfir. Konsep model siklus hara dalam sistem agroforestri secara umum disajikan pada Gambar 1.

Hara hasil mineralisasi dari bahan organik tanah (BOT), mineral tanah dan dari pemupukan memasuki pool hara tersedia dalam tanah. Hara tersedia selanjutnya dapat diserap oleh tanaman, atau mengalami imobilisasi karena adanya khelat oleh bahan organik tanah atau mineral tanah. Hara tersedia yang berada di dalam larutan tanah dapat terangkut oleh pergerakan air tanah keluar dari jangkauan perakaran tanaman sehingga menjadi tidak tersedia bagi tanaman. Dengan kata lain hara tersebut telah mengalami pencucian (*leaching*). Beberapa hara terutama dalam bentuk anion sangat lemah diikat oleh partikel liat dan memiliki tingkat mobilitas tinggi (misalnya nitrat), sehingga hara ini mudah mengalami pencucian. Di lain pihak hara dalam bentuk kation (misalnya kalium), gerakannya sangat ditentukan oleh kapasitas pertukaran tanah.

Di dalam ekosistem hutan alami tercipta “siklus hara tertutup” yaitu suatu sistem yang memiliki jumlah kehilangan hara lebih rendah dibandingkan dengan jumlah masukan hara yang diperoleh dari penguraian serasah atau dari serap ulang (*recycle*) hara pada lapisan tanah dalam. Atau dengan kata lain sistem hutan tersebut memiliki daya serap ulang yang tinggi (efisiensi penggunaan hara tinggi), sedang sistem pertanian memiliki siklus hara yang ‘terbuka’ atau ‘bocor’ karena memiliki jumlah kehilangan hara yang besar. Sistem agroforestri berada di antara ke dua sistem tersebut di atas.

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan akhir-akhir ini pada sistem agroforestri, ada 3 proses utama yang terlibat dalam siklus hara : (1) Fiksasi N dari udara: peningkatan jumlah N hasil penambatan dari udara bila tanaman legume yang ditanam, (2) Mineralisasi bahan organik: peningkatan jumlah hara dari hasil mineralisasi serasah dan dari pohon yang telah mati, (3) ‘Serap ulang’ hara: peningkatan jumlah serapan hara dari lapisan bawah oleh akar pepohonan yang menyebar cukup dalam. Akar pepohonan juga mengurangi jumlah kehilangan hara melalui erosi dengan jalan memperlambat laju aliran permukaan dan meningkatkan air infiltrasi karena adanya perbaikan porositas tanah.

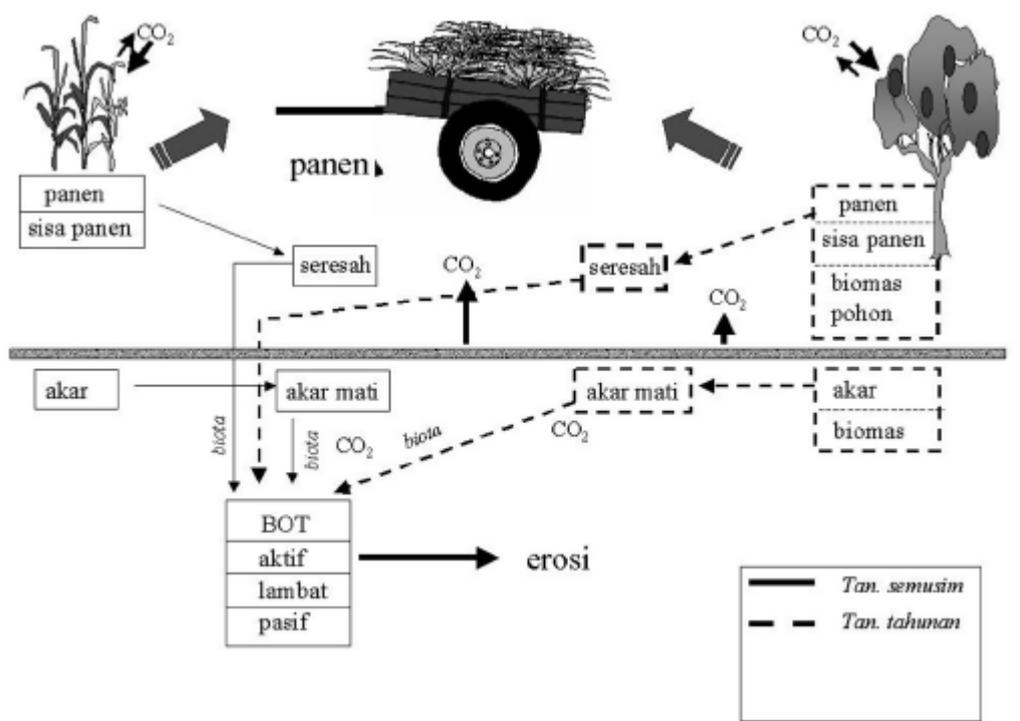


Gambar 1. Konsep model siklus hara dalam sistem agroforestri.

1.2 Siklus karbon (C)

Kebanyakan CO_2 di udara dipergunakan oleh tanaman selama fotosintesis dan memasuki ekosistem melalui serasah tanaman yang jatuh dan akumulasi C dalam biomasa (tajuk) tanaman. Separuh dari jumlah C yang diserap dari udara bebas tersebut diangkut ke bagian akar berupa karbohidrat dan masuk ke dalam tanah melalui akar-akar yang mati (Gambar 2). Ada 3 pool utama pemasok C ke dalam tanah adalah: (a) tajuk tanaman pohon dan tanaman semusim yang masuk sebagai serasah dan sisa panen; (b) akar tanaman, melalui akar-akar yang mati, ujung-ujung akar, eksudasi akar dan respirasi akar; (c) biota. Serasah dan akar-akar mati yang masuk ke dalam tanah akan segera dirombak oleh biota heterotrop, dan selanjutnya memasuki pool bahan organik tanah. Sedangkan kehilangan C dari dalam tanah

dapat melalui (a) respirasi tanah, (b) respirasi tanaman, (c) terangkut panen, (d) dipergunakan oleh biota, (e) erosi.

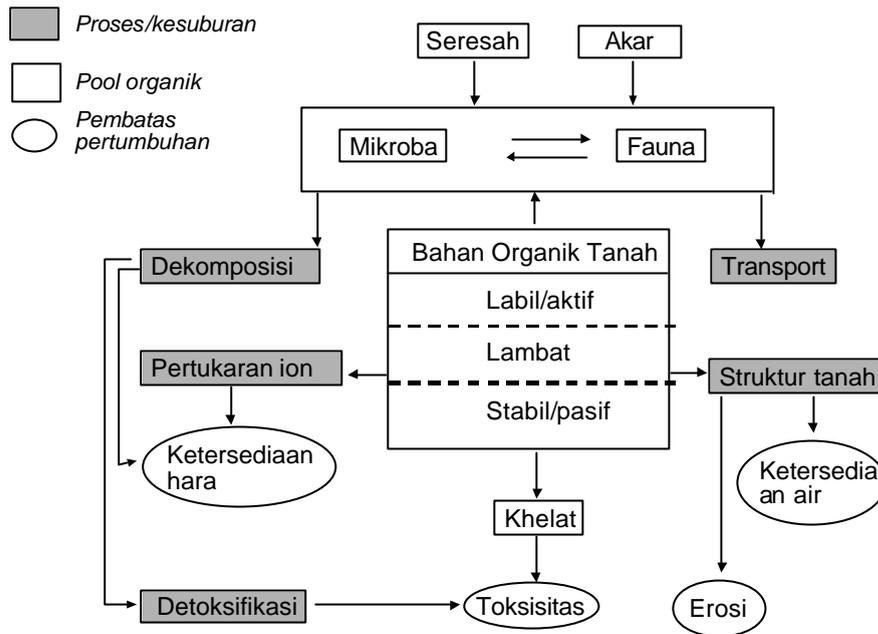


Gambar 2. Siklus karbon di dalam ekosistem

2. Ketersediaan BOT dan hara di daerah tropis

2.1 Fungsi BOT

Bahan organik merupakan salah satu komponen penyusun tanah yang sangat penting bagi ekosistem tanah, yaitu sebagai sumber ('source') dan pengikat ('sink') hara dan sebagai substrat bagi mikroba tanah. Macam BOT dapat diklasifikasikan ke dalam fraksi-fraksi berdasarkan ukuran, berat jenis, dan sifat-sifat kimianya. Peranan BOT terhadap perbaikan lingkungan pertumbuhan tanaman disajikan secara skematis dalam Gambar 3. Aktivitas mikroorganisma dan fauna tanah dapat membantu terjadinya agregasi tanah sehingga dapat meningkatkan ketersediaan air tanah dan mengurangi terjadinya erosi dalam skala luas. Telah banyak hasil penelitian yang membuktikan bahwa pelapukan BO dapat mengikat /mengkhelat Al dan Mn oleh asam-asam organik, sehingga dapat memperbaiki lingkungan pertumbuhan perakaran tanaman terutama pada tanah-tanah masam. Hasil mineralisasi BO dapat meningkatkan ketersediaan hara tanah dan nilai kapasitas tukar kation tanah (KTK), sehingga kehilangan hara melalui proses pencucian dapat dikurangi.



Gambar 3. Skematis peranan bahan organik tanah dalam perbaikan kesuburan tanah (Woomer dan Swift, 1994)

2.2 Ketersediaan BOT di daerah tropik

Tanah-tanah pertanian di daerah tropik basah umumnya memiliki kandungan bahan organik yang sangat rendah di lapisan atas. Pada tanah yang masih tertutup vegetasi permanen (hutan), umumnya kadar bahan organik di lapisan atas masih sangat tinggi. Perubahan hutan menjadi lahan pertanian mengakibatkan kadar BOT menurun dengan cepat. Hal ini antara lain disebabkan oleh beberapa alasan:

- Pelapukan (*dekomposisi*) bahan organik berlangsung sangat cepat, sebagai akibat tingginya suhu udara dan tanah serta curah hujan yang tinggi.
- Pengangkutan bahan organik keluar tanah bersama panen secara besar-besaran tanpa diimbangi dengan pengembalian sisa-sisa panen dan pemasukan dari luar, sehingga tanah kehilangan potensi masukan bahan organik.

Menurunnya kandungan BOT ini sangat mudah dikenali di lapangan antara lain tanah berwarna pucat dan padat (lihat contoh kasus 1).

Contoh kasus 1. Pemahaman petani: Tanah dingin – tanah kaya bahan organik

Dalam mengenali tingkat kesuburan tanah, banyak sekali indikator-indikator yang digunakan oleh peneliti, tetapi tidak dapat langsung dipahami oleh petani. Petani lokal memiliki istilah yang berbeda-beda antara satu daerah dengan daerah yang lain. Misalnya petani transmigrasi di Lampung mengamati bahwa tanah yang warnanya hitam pada umumnya adalah tanah yang kandungan bahan organiknya tinggi. Di kalangan petani, istilah bahan organik ini di lapangan lebih dikenal sebagai '**humus**' atau '**kompos**'. Tanah hitam itu disebut juga sebagai tanah '**dingin**', yang sifatnya sangat berbeda dengan tanah '**panas**' yang terlalu terbuka terhadap sinar matahari dan tidak subur. Tanah '**dingin**' adalah tanah yang subur, mudah diolah (gembur), selalu lembab, dan sangat sesuai untuk pertumbuhan tanaman. Ada pula petani yang mengukur tingkat kesuburan tanahnya berdasarkan tingkat ketersediaan 'humus' yang ditunjukkan oleh tingkat ke'**gembur**'an, dan ke'**bongkor**'an. Tanah bongkor menurut petani adalah tanah-tanah yang ditelantarkan karena tanah telah keras, tidak bisa ditanami lagi sehingga ditumbuhi alang-alang atau gulma lainnya sehingga produksi tanaman terus menurun, dan akhirnya ditelantarkan. Oleh karena itu istilah tanah bongkor yang digunakan oleh petani seringkali diterjemahkan sebagai tanah tidak subur, walaupun hal tersebut tidak selalu benar (beberapa petani mengatakan tanahnya 'bongkor' karena ketersediaan tenaga kerja terbatas).

Petani menyadari bahwa tanah dingin itu perlu dipertahankan. Supaya tanah tetap '**dingin**', lapisan serasah di permukaan tanah harus dipertahankan, seperti yang terdapat di hutan. Kenyataannya, sangatlah sulit mempertahankan kondisi tersebut pada lahan yang diusahakan untuk pertanian, terutama jika dilakukan pengolahan tanah secara intensif untuk pemberantasan gulma atau untuk persemaian. Usaha menggemburkan tanah melalui pengolahan tanah tersebut akan mempercepat hilangnya lapisan organik tanah, bila tidak diimbangi dengan masukan bahan organik secara terus menerus.

3. Pengukuran kandungan BOT

Indikasi penurunan BOT biasanya diukur dari kadar C-total dan N-total sehingga diperoleh nilai nisbah C/N, yang selanjutnya oleh model simulasi dapat dipakai untuk menaksir ketersediaan hara dari mineralisasi bahan organik. Namun penelitian terakhir membuktikan bahwa kadar C-total bukan merupakan tolok ukur yang akurat, karena hasil dari pengukuran tersebut diperoleh berbagai macam BOT. Menurut Woomer *et al.* (1994) BOT dibagi dalam beberapa kelompok menurut umur paruh dan komposisinya (Tabel 2). Umur paruh BOT tersebut ditaksir melalui simulasi model *CENTURY* (Parton *et al.*, 1987). Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa BOT lambat lapuk dan pasif (stabil) berada dalam tanah sejak puluhan bahkan mungkin ratusan tahun yang lalu. Kelompok ini meliputi asam-asam organik dan bahan organik yang terjerap kuat oleh liat yang tidak tersedia bagi tanaman dan biota. Penetapan kandungan C-total berdasarkan oksidasi basah dengan metoda *Walkey & Black* adalah mengukur semua kelompok BOT baik yang masih baru maupun yang sudah lama. Hasil penetapan itu tidak dapat dipergunakan untuk studi dinamika BOT pada berbagai sistem pengelolaan lahan karena hasilnya tidak akan menunjukkan perbedaan yang jelas. Untuk itu diperlukan penetapan kandungan fraksi-fraksi BOT sebagai tolok ukur.

Tabel 2. Pengelompokan BOT berdasarkan umur paruh yang ditaksir melalui simulasi model *CENTURY* (Parton *et al.*, 1987) dan komposisi kimianya (Woomer *et al.*, 1994).

Kelompok Bahan Organik Tanah	Umur Paruh (tahun)	Komposisi	Nama lain
Bahan organik metabolis (<i>Metabolic litter</i>)	0.1 - 0.5	Isi sel, selulosa	Sisa hewan, tanaman & manusia
Bahan organik struktural (<i>Structural litter</i>)	0.3 - 2.1	Lignin, polyfenol	Sisa tanaman
Bahan organik aktif (<i>Active pool</i>)	0.2 - 1.4	Biomasa mikrobia, Karbohidrat mudah larut, enzim exocellular	Fraksi labil
Bahan organik lambat lapuk (<i>Slow pool</i>)	8 - 50	Bahan organik ukuran partikel (50 μ m - 2.0 mm)	Fraksi labil
Bahan organik pasif (<i>Passive pool</i>)	400 - 2200	Asam-asam humik dan fulvik, kompleks organo-mineral (bahan organik yang terjerap kuat oleh mineral liat)	Substansi humus atau Fraksi stabil

Pada prinsipnya (berdasarkan fungsinya) bahan organik tersusun dari komponen *labil* dan *stabil*. Komponen labil terdiri dari bahan yang sangat cepat didekomposisi pada awal proses mineralisasi dan akumulasi dari *recalcitrant residue* (residu yang tahan terhadap pelapukan) yang merupakan sisa dari proses mineralisasi yang terdahulu. Umur paruh (*turnover*: adalah waktu yang dibutuhkan untuk mendekomposisi bahan organik sampai habis) dari fraksi labil dan stabil ini bervariasi dari beberapa bulan saja sampai ribuan tahun. Hasil percobaan isotop menunjukkan bahwa fraksi BOT dapat sangat stabil dalam tanah sampai lebih dari 9.000 tahun. Sekitar 60-80 % BOT dalam tanah-tanah pada umumnya terdiri dari substansi humus.

Fraksi Labil

Fraksi labil terdiri dari bahan yang mudah didekomposisi, dengan umur berkisar dari beberapa hari sampai beberapa tahun. Komponen BOT labil terdiri dari 3 kelompok :

- Bahan yang paling labil adalah bagian seluler tanaman seperti karbohidrat, asam amino, peptida, gula-amino, dan lipida.
- Bahan yang agak lambat didekomposisi seperti malam (*waxes*), lemak, resin, lignin dan hemiselulosa.
- Biomass dan bahan metabolis dari mikrobia (*microbial biomass*) dan bahan residu *recalcitrant* lainnya.

Fraksi labil berperan sangat penting dalam mempertahankan kesuburan tanah yaitu sebagai sumber hara tanaman karena komposisi kimia bahan asalnya dan tingkat dekomposisinya yang cepat. Biomasa mikrobia sangat penting dalam mempertahankan status BOT yang berperan sebagai *source* dan *sink* bagi ketersediaan hara karena daur hidupnya relatif singkat.

Faktor iklim makro yang menentukan kecepatan dekomposisi fraksi adalah temperatur dan kelembaban tanah serta keseimbangan biomasa mikrobia. Di daerah tropika basah yang memiliki resim temperatur isothermik atau isohiperthermik dan ketersediaan air tanah yang beragam sangat menentukan perkembangan populasi mikrobia tanah sehingga berpengaruh besar terhadap kecepatan dekomposisi komponen labil BO.

Substansi Humik: Fraksi Stabil

Komponen BOT yang paling sulit dilapuk adalah asam-asam humik. Asam-asam ini merupakan hasil pelapukan seresah (substansi organik menyerupai lignin) atau kondensasi substansi organik terlarut yang dibebaskan melalui dekomposisi gula, asam amino, polifenol dan lignin. Jadi bisa dikatakan bahwa substansi humik adalah produk akhir dekomposisi BOT oleh mikrobia.

Ketahanan substansi humik terhadap proses dekomposisi disebabkan konfigurasi fisik maupun struktur kimia yang sulit dipecahkan oleh mikrobia. Substansi ini secara fisik terikat kuat dengan liat dan koloidal tanah lainnya, atau dapat juga karena letaknya didalam agregat-mikro (Hassink, 1995 ; Matus, 1994) dan ditambah lagi dengan adanya hyphae ataupun akar-akar halus.

Kontribusi substansi humik terhadap ketersediaan hara masih belum banyak diketahui, karena waktu *turnover*-nya yang terlalu panjang. Namun demikian pool stabil dari bahan organik ini tetap memegang peranan penting sebagai *biological ameliorant* terhadap unsur-beracun bagi tanaman, juga sangat berperanan dalam pembentukan agregat tanah dan pengikatan kation dalam tanah. Peranan sebagai pengikat kation lebih diutamakan karena pada tanah-tanah masam BOT merupakan satu-satunya fraksi tanah bermuatan positif.

3.1 Mempertahankan Kandungan BOT

Bahan organik tanah memberikan pengaruh yang menguntungkan bukan hanya pada sifat kimia, tetapi juga sifat fisik dan biologi tanah. Untuk mendapatkan kondisi tanah yang optimal bagi pertumbuhan tanaman, diperlukan adanya BOT (C-total) di lapisan atas paling sedikit 2 % (Young, 1989). Jumlah ini didasarkan pada taksiran kasar saja, karena kandungan bahan organik tanah yang optimal berhubungan erat sekali dengan kandungan liat dan pH tanah.

Kandungan bahan organik tanah yang optimal harus dikoreksi dengan kandungan liat dan pH tanahnya (C_{ref}). Perhitungan sederhana telah dikembangkan oleh Van Noordwijk *et al.* (1997) adalah sebagai berikut:

$$C_{ref} = (Z_{contoh} / 7.5)^{0.42} \exp(1.333 + 0.00994 * \%liat + 0.00699 * \%debu - 0.156 * pH_{KCl} + 0.000427 * \text{ketinggian tempat})$$

Persamaan 2.

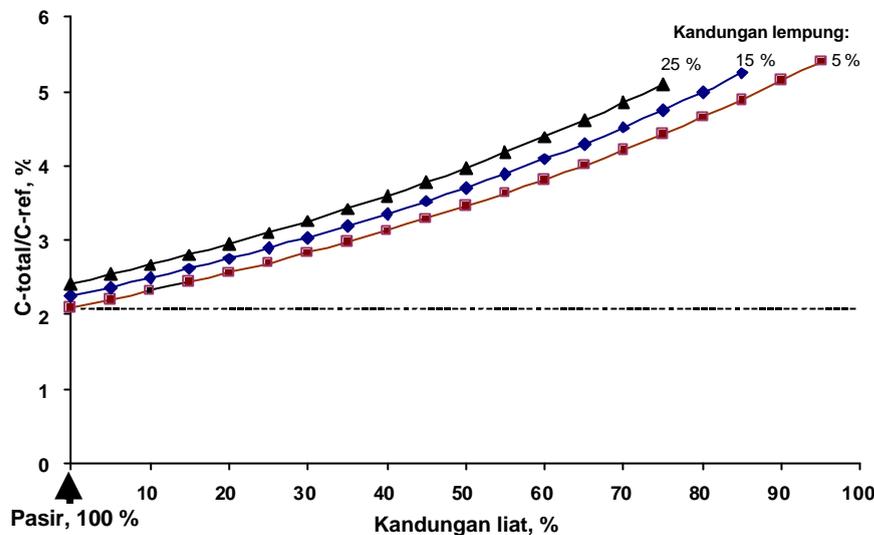
di mana: Z_{contoh} = kedalaman pengambilan contoh tanah, cm

Ketinggian tempat = m di atas permukaan laut.

Persamaan ini berlaku untuk semua lahan kering dan tanah vulkanik muda. Dengan demikian dapat ditetapkan **kejenuhan bahan organik tanah (C_{total}/C_{ref})** yaitu nisbah antara **kandungan total bahan organik tanah (C_{total} atau C_{org})** pada kondisi sekarang dengan **kandungan bahan organik tanah yang dikoreksi (C_{ref})**.

Hubungan antara kondisi BOT yang telah dikoreksi dengan kandungan liat tanah (C_{tot} / C_{ref}) dengan kandungan liat pada tanah hutan (pH 4.0) di Sumatra (Van Noordwijk, personal com.) disajikan pada Gambar 4.. Dari gambar tersebut dapat dipelajari bahwa BOT sejumlah 2 % adalah merupakan jumlah maksimum yang dapat diperoleh pada tanah pasir. Untuk tanah liat, jumlah kandungan BOT sekitar 2 % berarti tanah tersebut telah kehilangan C-organik sekitar 50% dari jumlah maksimum. Maka jumlah BOT 2 % yang dikemukakan oleh Young (1989) tersebut di atas menjadi terlalu tinggi untuk tanah pasir dan terlalu rendah untuk tanah liat. Oleh karena itu target rata-rata untuk berbagai jenis

tanah sebaiknya sekitar 2.5- 4 %. Untuk mempertahankan kondisi, tanah pertanian harus selalu ditambah bahan organik minimal sebanyak 8 - 9 ton ha⁻¹ setiap tahunnya (Young, 1989).



Gambar 4. Referensi kandungan C tanah hutan pada berbagai jumlah kandungan liat (%) di Sumatra.

4. Peranan agroforestri dalam mempertahankan kandungan BOT dan ketersediaan hara dalam tanah

Pertanyaan

- Bagaimana cara anda mengenali bahwa pohon memperbaiki kesuburan tanah?
- Bagaimana mekanismenya?

Pohon memberikan pengaruh positif terhadap kesuburan tanah, antara lain melalui: (a) peningkatan masukan bahan organik (b) peningkatan ketersediaan N dalam tanah bila pohon yang ditanam dari keluarga leguminose, (c) mengurangi kehilangan bahan organik tanah dan hara melalui perannya dalam mengurangi erosi, limpasan permukaan dan pencucian, (d) memperbaiki sifat fisik tanah seperti perbaikan struktur tanah, kemampuan menyimpan air (*water holding capacity*), (e) dan perbaikan kehidupan biota. Beberapa proses yang terlibat dalam perbaikan kesuburan tanah oleh pohon dalam sistem agroforestri antara lain disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hipotesis Pengelolaan Tanah secara Biologi untuk Penggunaan Lahan yang Berkelanjutan (misalnya agroforestri) (Huxley, 1999).

A	Lewat proses-proses dalam tanah
1	Mengurangi erosi tanah.
2	Mempertahankan kandungan bahan organik tanah
3	Memperbaiki dan mempertahankan sifat fisik tanah (lebih baik dibanding tanaman semusim).
4	Menambah jumlah kandungan N tanah melalui fiksasi N dari udara oleh tanaman legume
5	Sebagai jaring penyelamat hara yang tercuci di lapisan tanah bawah, dan menciptakan daur ulang ke lapisan tanah atas melalui mineralisasi seresah yang jatuh di permukaan tanah.
6	Membentuk kurang lebih sistem ekologi yang tertutup (yaitu menahan semua, atau hampir semua, atau sebagian besar unsur hara di dalam sistem)
7	Mengurangi kemasaman tanah (melalui pelepasan kation dari hasil mineralisasi seresah)
8	Mereklamasi tanah yang terdegradasi
9	Memperbaiki kesuburan tanah lewat masukan biomass dari sistem perakaran pohon dan kontribusi dari bagian atas pohon
10	Memperbaiki aktivitas biologi tanah dan mineralisasi N lewat naungan pohon
11	Memperbaiki asosiasi mikoriza lewat interaksi tanaman dan pohon
B	Lewat interaksi biofisik
12	Memperbaiki penyerapan hujan, cahaya dan nutrisi mineral, sehingga meningkatkan produksi
13	biomass.
14	Memperbaiki efisiensi penyerapan hujan, cahaya dan nutrisi mineral yang dipakai.
Terhindar dari penyebaran dan kerusakan yang disebabkan oleh serangan hama dan penyakit	
C	Keuntungan lingkungan yang lain dari pohon atau semak
15	Meningkatkan fiksasi N pohon legume melalui peningkatan jumlah bintil akar bila akar pohon legume tersebut tumbuh berdekatan atau kontak langsung dengan akar tanaman bukan pemfiksasi N (mungkin dikarenakan adanya perpindahan langsung dari unsur N atau rendahnya ketersediaan N dalam tanah yang meningkatkan efektifitas bintil akar)
16	Tajuk pohon dapat melindungi tanah dari bahaya erosi
17	Pepohonan memberikan peneduh bagi tanaman yang membutuhkan naungan (misalnya kopi) dan menekan populasi rerumputan yang tumbuh dibawahnya.

4.1 Sumbangan bahan organik dalam sistem agroforestri

Masukan bahan organik melalui hasil pangkasan pohon

Pepohonan dalam sistem agroforestri memberikan masukan bahan organik melalui daun, ranting dan cabang yang telah gugur di atas permukaan tanah. Di bagian bawah (dalam tanah), pepohonan memberikan masukan bahan organik melalui akar-akar yang telah mati, tudung akar yang mati, eksudasi akar dan respirasi akar.

Dari *Tabel 3* dapat diketahui banyaknya masukan bahan organik dalam sistem budidaya pagar = *hedgerow intercropping* di Lampung Utara. Pohon ditanam berbaris sebagai pagar. Lorong yang terbentuk di antara baris pohon ditanami tanaman semusim. Tajuk tanaman pagar dipangkas secara rutin bila telah mulai menaungi tanaman semusim. Semua hasil pangkasan dikembalikan ke dalam petak lahan sebagai mulsa, namun cabang yang garis-tengahnya lebih dari 5 cm diangkut keluar lahan. Beberapa jenis tanaman pagar dari keluarga leguminosa yang ditanam yaitu *Calliandra* yang dapat memberikan hasil biomasa tertinggi dibanding jenis pohon lainnya yang diuji (*Tabel 3*), dadap minyak (*Erythrina*) memberikan hasil terendah. Gamal (*Gliricidia*) dan petaian (*Peltophorum*) atau kombinasi keduanya dapat memenuhi target masukan bahan organik ke dalam tanah dengan jumlah

produksi rata-rata 8 ton ha⁻¹ setiap tahunnya. Masukan N yang berasal dari bahan organik ini ke dalam tanah berkisar antara 100 - 270 kg N ha⁻¹. Bila ditinjau dari besarnya masukan bahan organik asal pangkasan ini, nampaknya sistem budidaya pagar dapat memberikan harapan baru bagi petani dalam mengelola kesuburan tanah di lahannya. Tetapi sistem ini tampaknya kurang diminati atau disukai petani.

Masukan serasah dari daun yang gugur

Tanaman memberikan masukan bahan organik melalui daun-daun, cabang dan rantingnya yang gugur, dan juga melalui akar-akarnya yang telah mati. Contoh dari tanah masam di Lampung pohon petaian (*Peltophorum*) monokultur memberikan masukan serasah (daun, batang, ranting yang jatuh) sekitar 12 ton ha⁻¹ th⁻¹; gamal (*Gliricidia*) monokultur sekitar 5 ton ha⁻¹ th⁻¹. Sedang hutan sekunder memberikan masukan sekitar 8-9 ton ha⁻¹ th⁻¹.

Serasah yang jatuh di permukaan tanah dapat melindungi permukaan tanah dari pukulan air hujan dan mengurangi penguapan. Tinggi rendahnya peranan serasah ini ditentukan oleh kualitas bahan organik tersebut. Semakin rendah kualitas bahan, semakin lama bahan tersebut dilapuk, sehingga terjadi akumulasi serasah yang cukup tebal pada permukaan tanah hutan. Wasrin *et al.* (1997) melaporkan akumulasi bahan organik pada berbagai sistem berbasis pohon (Tabel 4).

Tabel 3. Total masukan biomas tajuk rata-rata per tahun yang merupakan hasil pangkasan rata-rata tiga kali setahun, kandungan N daun dan total masukan N ke dalam tanah.

Jenis tanaman	Berat Kering Tajuk (ton ha ⁻¹)	N (%)	N-total (kg ha ⁻¹)
<i>Dadap</i> (<i>Erythrina</i>)	4.5	2.4	108
<i>Lamtoro</i> (<i>Leucaena</i>)	6.0	3.0	180
<i>Gamal</i> (<i>Gliricidia</i>)	8.0	2.9	232
<i>Petaian</i> (<i>Peltophorum</i>)	8.0	1.7	136
Gamal/petaian	8.0	2.7	216
<i>Calliandra</i>	10.0	2.7	270

Tabel 4. Biomasa serasah pada permukaan tanah berbagai sistem penggunaan lahan berbasis pohon di Jambi (Wasrin *et al.*, 1997).

Sistem Penggunaan Lahan	Berat kering Serasah, ton ha ⁻¹		Total ton ha ⁻¹
	Kayu	Non kayu	
Hutan Primer di Pasir Mayang	1.72	2.23	3.95
Hutan Primer di Rantau Pandan	0.98	1.80	2.78
Hutan Bekas tebangan (logged over forest)	2.88	3.06	5.94
HTI monokultur (sengon)	3.09	4.14	7.23
Agroforest Karet (20 th)	0.74	1.80	2.54
Agroforest Karet	0.93	1.35	2.28
Kebun durian	2.25	3.16	5.41
Kebun karet muda (5 th)	1.56	2.38	3.94
Hutan alami sekunder	2.96	3.07	6.03

Penebangan hutan meningkatkan jumlah akumulasi serasah terutama dalam bentuk kayu (cabang dan ranting). Pada sistem berbasis pohon ini akumulasi serasah pada permukaan tanah bervariasi berkisar antara 3-7 ton ha⁻¹. Bila kandungan C dalam biomas sekitar 45 %, maka masukan C ke dalam tanah sekitar 1.5 - 3 ton ha⁻¹.

4.2 Kualitas bahan organik

Pemberian bahan organik ke dalam tanah seringkali memberikan hasil yang kurang memuaskan, sehingga banyak petani tidak tertarik untuk melakukannya. Hal ini disebabkan kurangnya dasar pengetahuan dalam memilih jenis bahan organik yang tepat. Pemilihan jenis bahan organik sangat ditentukan oleh tujuan pemberian bahan organik tersebut. Tujuan pemberian bahan organik bisa untuk penambahan hara atau perbaikan sifat fisik seperti mempertahankan kelembaban tanah yaitu sebagai mulsa. Pertimbangan pemilihan jenis bahan organik didasarkan pada kecepatan dekomposisi atau melapuknya. Bila bahan organik akan dipergunakan sebagai mulsa, maka jenis bahan organik yang dipilih adalah dari jenis yang lambat lapuk. Apabila digunakan untuk tujuan pemupukan bisa dari jenis yang lambat maupun yang cepat lapuk.

Kecepatan pelapukan suatu jenis bahan organik ditentukan oleh **kualitas** bahan organik tersebut. Penetapan kualitas dilakukan dengan menggunakan seperangkat tolok ukur, yang berbeda-beda untuk setiap jenis unsur hara.

- Kualitas bahan organik berkaitan dengan penyediaan unsur N, yang ditentukan oleh besarnya kandungan N, lignin dan polifenol. Bahan organik dikatakan berkualitas tinggi bila kandungan N tinggi, konsentrasi lignin dan polifenol rendah. Nilai kritis konsentrasi N adalah 1.9 % ; lignin > 15 % dan polifenol > 2 %. Tolok ukur lain yang juga penting adalah tingginya *sinkronisasi* saat ketersediaan hara dengan saat tanaman membutuhkannya.
- Kualitas bahan organik berkaitan dengan penyediaan unsur P ditentukan oleh konsentrasi P dalam bahan organik. Nilai kritis kadar P dalam bahan organik adalah 0.25 %.

Pertanyaan

- Bila ditinjau dari peranan Agroforestri dalam mempertahankan air tanah dan hara , kualitas serasah yang bagaimana yang seharusnya dipilih untuk mencapai tujuan tersebut.
- Apakah kualitas bahan organik juga perlu dipertimbangkan dalam menekan limpasan permukaan pada lahan berlereng? Jelaskan

Hasil analisis beberapa variabel yang dipakai sebagai tolok ukur kualitas bahan organik akan sangat membantu petani dalam memilih jenis bahan organik yang sesuai dengan kebutuhannya. Beberapa hasil pengukuran kualitas bahan organik dapat dilihat dalam contoh kasus 2.

Contoh Kasus 2.

Hasil Penelitian: Komposisi Bahan Organik

Hasil pengukuran kandungan lignin, polifenolik dan total kation (Ca+Mg+K) pada beberapa jenis tanaman pepohonan di Lampung disajikan pada Tabel 5. Bahan organik asal pangkasan gamal (*Gliricidia*) merupakan bahan yang paling cepat melepaskan unsur hara bila dibandingkan dengan seresah asal daun jambu karena kandungan ligninnya lebih tinggi. Seresah gamal akan cepat habis terdekomposisi dalam waktu 4 minggu (Handayanto, 1997). Petaian memiliki kualitas lebih rendah dibanding gamal, bukan karena kandungan ligninnya, melainkan karena kandungan polifenoliknya yang lebih tinggi. Dalam waktu 4 minggu petaian baru melepaskan sekitar sepertiga dari N yang dikandungnya.

Tabel 5. Konsentrasi total kation, nisbah C/N, Lignin : N (Lg/N), Polyphenolic : N (Pp/N) dari biomas yang dipakai dalam percobaan inkubasi.

Spesies	N %	C: N	L %	P %	Lg :N	Pp:N	(Lg+Pp) /N	Σ kation cmol kg ⁻¹
1 Kaliandra/ <i>Calliandra</i>	3.65	13.1	12	4.26	3.29	1.17	4.45	58.8
2 Petaian/ <i>Peltophorum</i>	2.47	13.6	19	4.76	7.69	1.93	9.62	58.4
3 Gamal/ <i>Gliricidia</i>	4.57	10.2	11	1.80	2.41	0.39	2.80	52.9
4 Lamtoro/ <i>Leucaena</i>	3.28	14.8	12	2.30	3.66	0.70	4.36	42.1
5 <i>Flemingia</i>	3.22	17.6	9	2.59	2.80	0.80	3.60	36
6 Jambu air/ <i>Syzigium</i>	2.81	8.7	32	0.32	11.4	0.11	11.5	88.9
7 Bulangan/ <i>Gmelina</i>	6.11	6.7	28	1.10	4.58	0.18	4.76	126.2
8 Sungkai/ <i>Perunema</i>	5.85	9.0	37	1.56	6.33	0.27	6.59	72.5
9 Krinyu/ <i>Chromolaena</i>	1.88	27.7	32	2.33	17	1.24	18.3	100
10 Alang-alang/ <i>Imperata</i>	0.78	74	11	0.65	14	0.83	14.9	19.45

Informasi hasil analisis beberapa jenis bahan ini dapat dipakai sebagai dasar menentukan kualitas bahan organik, sehingga dapat menaksir kecepatan mineralisasinya dalam model simulasi WaNuLCAS. Lebih jauh hal ini dapat dipakai untuk memilih jenis pepohonan yang memiliki sinkronisasi cukup tinggi dengan tanaman semusim yang ada.

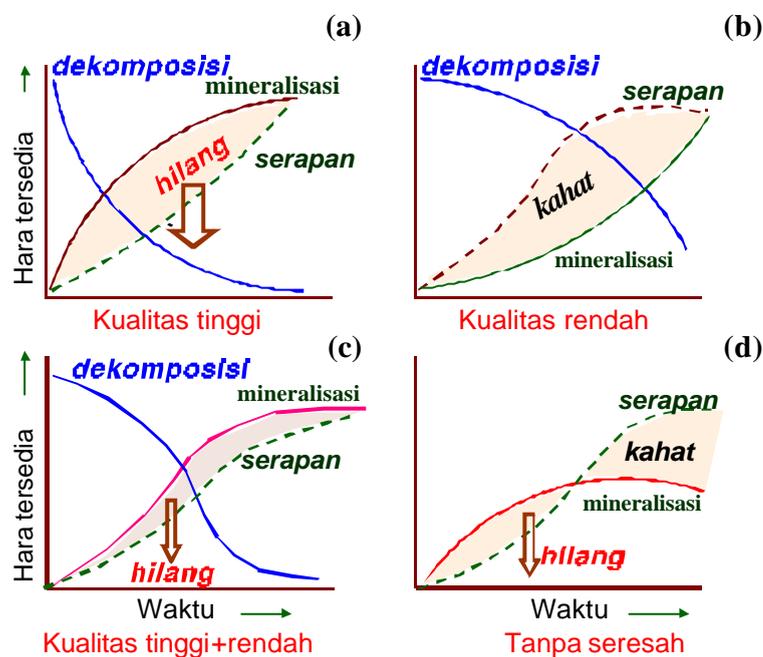
4.3 Efisiensi penggunaan hara

Penambahan bahan organik ke dalam tanah baik melalui pengembalian sisa panen, kompos, pangkasan tanaman penutup tanah dan sebagainya dapat memperbaiki cadangan total BOT (*capital store C*). Praktek pertanian secara terus-menerus akan mengurangi cadangan total C dan N dalam tanah. Apabila ada pemberaan maka secara bertahap kondisi tersebut akan pulih kembali. Dari semua unsur hara, unsur N dibutuhkan dalam jumlah paling banyak tetapi ketersediaannya selalu rendah, karena mobilitasnya dalam tanah sangat tinggi. Kemampuan tanah dalam menyediakan hara N sangat ditentukan oleh kondisi dan jumlah bahan organik tanah.

Tiga sumber utama N tanah berasal dari (1) bahan organik tanah, (2) N tertambat dari udara bebas oleh tanaman kacang-kacangan (legume) yang bersimbiosis dengan bakteri rhizobium dan (3) dari pupuk anorganik. Pelapukan bahan organik di daerah tropik sangat cepat mengakibatkan N juga cepat dilepas dalam bentuk N-anorganik yang mudah tersedia bagi tanaman. Unsur N yang tersedia dalam jumlah besar ini tidak menjamin tercapainya

produksi tanaman yang optimum ! Hasil-hasil penelitian di Lampung Utara menunjukkan bahwa penambahan bahan organik asal famili kacang-kacangan (legume) dapat melepaskan hara N sekitar 20 - 45 % dari jumlah total N yang terkandung di dalamnya (Handayanto *et al.*, 1994) selama satu siklus tanaman semusim. Dari jumlah yang dilepaskan ternyata hanya sekitar 30 % nya yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman semusim.

Timbul pertanyaan: mengapa hanya sedikit hara yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman semusim? Hal ini kemungkinan disebabkan saat tersedia N dalam tanah tidak bertepatan dengan saat tanaman membutuhkannya. Kondisi ini disebut sebagai sinkronisasi antara ketersediaan hara dan kebutuhan tanaman. Tingkat sinkronisasi ini ditentukan oleh kecepatan dekomposisi (melapuk) dan mineralisasi (pelepasan unsur hara) bahan organik. Kecepatan melapuk bahan organik ditentukan oleh berbagai faktor antara lain kelembaban, suhu tanah dan kualitas bahan organik. Gambar 5. menyajikan secara skematis sinkronisasi antara ketersediaan hara dan kebutuhan tanaman dari berbagai masukan kualitas masukan bahan organik.



Gambar 5. Skematis sinkronisasi saat ketersediaan hara dari hasil mineralisasi dengan saat tanaman membutuhkannya pada berbagai macam masukan bahan organik (a) kualitas tinggi, (b) kualitas rendah, (c) campuran kualitas tinggi dan rendah dan (d) tanpa masukan bahan seresah (Myers *et al.*, 1995).

Bahan organik berkualitas tinggi akan cepat dilapuk dan akibatnya unsur hara (misalnya N) dilepaskan dengan cepat menjadi bentuk tersedia. Jika yang ditanam adalah tanaman yang lambat pertumbuhannya, maka pada saat bahan organik dilapuk dan unsur hara N dilepaskan dalam jumlah maksimal, ternyata tanaman belum membutuhkan N dalam jumlah banyak. Dengan kata lain terjadi kelebihan N tersedia tetapi tidak bisa dimanfaatkan oleh tanaman, sehingga N yang berlebih ini dapat hilang melalui pencucian dan penguapan (Gambar 5.a). Sebaliknya pada saat tanaman tersebut membutuhkan N dalam jumlah banyak (ketika mencapai fase pertumbuhan cepat), ternyata N tersedia dalam tanah sudah tidak mencukupi lagi. Pengaruh yang berbeda akan dijumpai apabila bahan organik yang berkualitas rendah diberikan pada tanaman yang pertumbuhannya cepat. Pada saat tanaman membutuhkan unsur N dalam jumlah banyak, bahan organik belum termineralisasi, sehingga N tersedia dalam tanah tidak cukup. Dalam hal ini terjadi tingkat sinkronisasi

rendah, di mana penyediaan hara lambat sementara tanaman telah membutuhkannya, sehingga terjadi kekahatan hara (Gambar 5.b.).

Idealnya, tanaman pagar harus mampu menghasilkan serasah dengan kemampuan melapuk cukup lambat untuk menekan kehilangan N yang dilepaskan, tetapi cukup cepat untuk menjamin ketersediaan N pada saat dibutuhkan tanaman. Kenyataannya, sangat sulit menemukan pohon yang memiliki sifat ideal seperti ini. Untuk mengatasi masalah ini, biasanya pohon dengan serasah yang cepat melapuk ditanam bersama-sama dengan pohon yang memiliki serasah lambat lapuk (Gambar 5.c.).

Bila tidak ada masukan bahan organik ke dalam tanah (Gambar 5.d.), akan terjadi masalah pencucian dan sekaligus kelambatan penyediaan hara. Pada kondisi seperti ini penyediaan hara hanya terjadi dari mineralisasi bahan organik yang masih terdapat dalam tanah, sehingga mengakibatkan cadangan total C tanah semakin berkurang.

5. Neraca hara

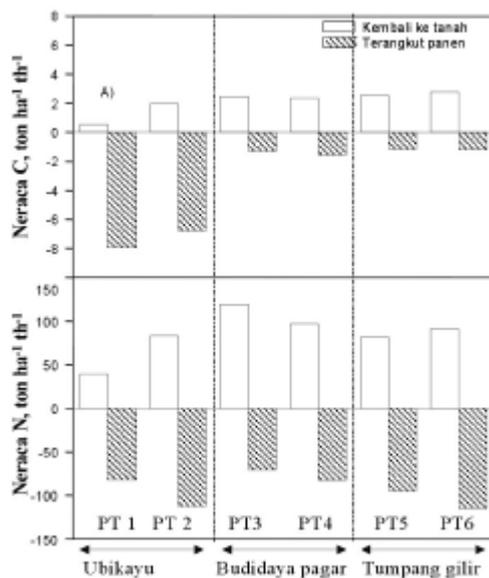
Penyediaan lahan untuk pertanian kebanyakan dilakukan dengan cara menebang dan membakar pepohonan atau alang-alang (sistem tebang-bakar). Pembakaran vegetasi mengakibatkan hampir semua cadangan C dan N hilang, tetapi petani masih tetap memilih cara ini karena mudah dan murah. Cara ini dapat menambah pupuk secara cuma-cuma dari hasil pembakaran biomasa, dapat meningkatkan pH, P-tersedia dan kation basa dalam jumlah besar. Setelah pembakaran, tanah menjadi lebih subur dan bebas gulma, hama dan penyakit, sehingga biasanya langsung ditanami tanaman pangan (misalnya ubikayu, jagung atau padi). Setelah beberapa tahun, produksi semakin rendah karena tanah semakin tidak subur. Salah satu penyebab turunnya produksi tanaman semusim adalah penurunan kesuburan tanah. Hal ini terjadi karena adanya pengangkutan hara keluar dari petak yang terjadi terus-menerus dalam jumlah besar melalui panen, pencucian dan erosi. Sementara itu jumlah hara yang kembali ke dalam tanah melalui daun yang gugur dan pengembalian sisa panen lebih sedikit dibanding hara yang diangkut ke luar, sehingga setiap tahun terjadi defisit hara. Akibatnya, tanaman pada musim berikutnya akan mengalami kahat hara, sehingga perlu diberi pupuk. Petani sering mengakui bahwa karena kekurangan modal untuk beli pupuk mengakibatkan produksi tanaman selalu menurun. Hal ini membuktikan bahwa jumlah hara tersedia dalam tanah lebih sedikit dibanding jumlah yang dibutuhkan tanaman (Lihat contoh Kasus 3)

Contoh kasus 3. Neraca C pada berbagai pola tanam

Pengukuran neraca karbon (C) dilakukan pada beberapa macam pola tanam di Pakuan Ratu, yaitu pola berbasis ubikayu, budidaya pagar dan tumpang gilir tanaman leguminosa (kacang-kacangan). Hasilnya menunjukkan bahwa pola tanam berbasis ubi kayu memberikan neraca C negatif (artinya jumlah C yang terangkut keluar > jumlah C yang kembali ke tanah), dengan jumlah yang terangkut sebagai umbi dan batang sekitar $7 \text{ ton ha}^{-1} \text{ th}^{-1}$. Pola tanam budidaya pagar memberikan neraca C positif, di mana jumlah keluaran C yang terangkut panen sekitar $1.5 \text{ ton ha}^{-1} \text{ th}^{-1}$, dan masukan C sekitar $2.5 \text{ ton ha}^{-1} \text{ th}^{-1}$ sebagai biomas hasil pangkasan. Pola tanam tumpang gilir dengan tanaman kacang-kacangan penutup tanah menghasilkan kelebihan (surplus) masukan C ke dalam tanah sekitar $1.5 \text{ ton ha}^{-1} \text{ th}^{-1}$.

Sedang pada neraca N, pola tanam berbasis ubikayu (Gambar 7: PT 1 dan 2) menghasilkan neraca negatif. Pola tanam budidaya pagar (PT 3 dan 4) dan kacang-kacangan (PT 5) menghasilkan neraca positif. Pola tanam budidaya pagar (PT 6) memberikan neraca netral karena adanya pengangkutan N melalui biji kacang tunggak. Pada sistem budidaya pagar terjadi surplus N sekitar $15\text{-}50 \text{ kg ha}^{-1}$; dan untuk sistem rotasi sekitar $10\text{-}20 \text{ kg ha}^{-1}$.

Pola tanam berbasis ubikayu memberikan neraca N minus sekitar 60 kg ha^{-1} (Gambar 7.B.). Hasil perhitungan ini belum memperhitungkan adanya kehilangan N melalui pencucian, erosi atau penguapan maupun besarnya masukan N dari hasil penambatan N dari udara oleh tanaman kacang-kacangan. Perhitungan neraca C dan N ini dapat dipakai untuk menjelaskan mengapa selalu terjadi penurunan produksi ubikayu setelah hutan dikonversi menjadi lahan pertanian. Dengan sistem budi daya pagar, produksi jagung dapat meningkat sekitar 1.5 ton ha^{-1} (Van Noordwijk *et al.*, 1995).



Mengingat produksi tanaman yang diperoleh per satuan tenaga kerja masih lebih rendah bila dibandingkan dengan produksi dari pembukaan lahan baru, maka petani akan memilih membuka lahan baru dan meninggalkan lahan yang lama. Lahan pertanian yang telah terlantar tersebut akhirnya ditumbuhi gulma alang-alang (*Imperata cylindrica*).

Gambar 7. Neraca C dan N dari berbagai sistem pola tanam di Lampung Utara (Hairiah *et al.*, 2000).

PT	Uraian Pola Tanam
1	Ubikayu monokultur
2	Ubikayu + jagung + padi / kacang tanah
3	Budidaya pagar; tanaman pagar yang ditanam petanian dicampur dengan gamal tumpang sari dengan jagung + padi / kacang tanah/kc. tunggak
4	Budidaya pagar; tanaman pagar yang ditanam <i>Flemingia</i> tumpang sari dengan jagung + padi / kacang tanah/kc.tunggak
5	Tumpang gilir: Jagung + padi / kacang tanah/ kacang tunggak
6	Tumpang gilir: Jagung + padi / kacang tanah/koro benguk

+ berarti tumpang sari; / berarti diikuti oleh tanaman berikutnya atau tumpang gilir

6. Neraca C dalam WaNuLCAS

Pada prinsipnya parameter-parameter yang digunakan dalam model simulasi WaNuLCAS untuk mempelajari dinamika C sama dengan yang digunakan dalam model CENTURY (Parton *et al*, 1997). Di dalam model simulasi WaNuLCAS, bahan organik terdiri dari pool 'struktural', 'aktif' dan 'pasif'. Terminologi yang digunakan sama dengan yang telah diuraikan dalam bahan ajar ini.

Pada agro-ekosistem tanpa olah tanah, lapisan organik terbentuk di atas permukaan tanah yang akan mengalami dekomposisi walaupun tidak ada kontak langsung dengan tanah mineral. Dinamika C dan N dalam lapisan organik tersebut berbeda dengan lapisan tanah mineral pada setiap kedalaman, dikarenakan adanya '*perlindungan fisik*' BOT terhadap serangan biota. Hal ini terjadi dikarenakan adanya perbedaan kandungan liat, suhu dan ketersediaan air pada setiap kedalaman dalam profil tanah. Pembentukan bahan organik ke dalam lapisan tanah bawah dapat disebabkan oleh adanya aktivitas biota atau adanya pengolahan tanah.

Menurut model CENTURY masukan bahan organik ke dalam tanah melalui sisa panen, daun dan cabang gugur (serasah), hasil pangkasan dan hasil penyiangan gulma merupakan tambahan C, N, lignin dan polifenol sehingga merubah jumlah bahan organik 'struktural' dan pool 'aktif'. Baru-baru ini model WaNuLCAS versi 2.1 (lihat manual di Web site) telah memperhitungkan polifenol sebagai bahan yang menyebabkan immobilisasi unsur N asal mineralisasi bahan organik dan dari tanah mineral, sehingga menjadi pool C dan N 'lambat'.

Immobilisasi N juga dapat terjadi bila BOT dari pool metabolik dan khususnya pool struktural dipergunakan oleh biomasa mikrobia sehingga menjadi pool 'aktif' dengan nisbah C/N rendah dan pool 'lambat' untuk bagian 'struktural'nya. Mineralisasi C dalam tanah ini sangat ditentukan oleh jumlah pool C yang ada dan kecepatan dekomposisi bahan organik (**k**), dengan demikian mineralisasi C akan mempengaruhi mineralisasi N.

Bila dalam lapisan tanah N mineral (NH_4 dan NO_3) tersedia cukup, maka ini akan memenuhi 'target' nisbah C/N pool bahan organik fase berikutnya. Tetapi bila N mineral tidak cukup, maka nisbah C/N pool bahan organik berikutnya akan meningkat. Hal ini akan mempunyai dua macam pengaruh terhadap bahan organik tanah:

Transformasi BOT selanjutnya akan lebih lambat, dan akan berhenti total bila biomasa mikrobia telah mencapai nilai C/N yang di 'target'kan yaitu 1.75.

Pool BOT akan tetap 'lapar' akan N mineral dan mengumpulkan N hingga memenuhi 'target'.

Bentuk modifikasi model CENTURY ini hanya relevan untuk simulasi jangka waktu pendek (bisa per hari, sedang CENTURY mungkin per tahun). Model ini dapat dipakai untuk mensimulasi N-mineral yang hilang dalam tanah setelah pupuk diberikan dan selanjutnya pupuk itu menjadi tersedia bagi tanaman yang ditanam musim berikutnya .

Struktur yang ada dalam model simulasi WaNuLCAS:

Nilai **k** menentukan transformasi C dan N sebagai fungsi dari kandungan liat, suhu kandungan air. Sebagai contoh pada pool aktif, **k** dapat dihitung sebagai berikut:

$$K = 0.14 * (1 - 0.75 * Mc_SiltClay) * Mc_TempLim * Mc_TethaLim[Zone]$$

Nilai 0.14 dan 0.75 adalah nilai bagi pool aktif.

Informasi lebih lengkap dapat dibaca pada buku panduan WaNuLCAS version 2.0 (Van Noordwijk, M dan B. Lusiana, 2000) atau lihat di WEB Site: <http://www.icraf.cgiar.org/sea/AgroModels/Agromodels.htm>

7. Latihan: Model Penyediaan Unsur Hara menggunakan model WaNuLCAS

Contoh simulasi ini dilakukan pada Ultisols di Karta, Pakuan Ratu. Data kesuburan tanah dan iklim yang digunakan diperoleh dari proyek BMSF (4° 30'S, 104°98'E). Tanah ini diklasifikasikan sebagai *Grossarenic Kandiudult* (Van der Heide *et al.*, 1992), yang dicirikan oleh nilai KTK yang rendah, miskin hara dan bahan organik, pH rendah, tekstur agak berpasir tetapi liat meningkat di lapisan bawah, kejenuhan Al yang tinggi di lapisan bawah. Data iklim yang digunakan adalah data yang diperoleh pada musim tanam September 1997-September 1998. Lokasi ini termasuk daerah tropik basah, masalah pencucian hara dan penurunan kandungan bahan organik merupakan hal yang umum terjadi di lahan pertanian di daerah ini.

Salah satu teknik alternatif pengelolaan tanah di daerah ini adalah sistem tumpangsari pepohonan yang berperakaran dalam dengan tanaman semusim yang umumnya berperakaran lebih dangkal. Pepohonan ditanam berbaris, dan lorong antar baris pohon ditanami tanaman semusim (jagung). Tanaman pagar yang ditanam adalah petaian dengan jarak tanam 4 x 0.5 m. Untuk menguji manfaat penyisipan pepohonan di antara tanaman jagung, budidaya pagar ini perlu dibandingkan dengan pola tanam monokultur. Pada kedua pola tanam ini, diperlakukan dengan dan tanpa pemupukan N. Pupuk N sebanyak 30 kg ha⁻¹ diberikan pada saat jagung berumur 7 hari, dan 60 kg ha⁻¹ diberikan pada saat jagung berumur satu bulan. Simulasi dilakukan selama 9 tahun pada kedalaman tanah 0.8 m. Skenario pola tanam yang diuji dapat diringkaskan dalam Tabel 9:

Tabel 9. Skenario pola tanam yang diuji dalam simulasi WaNuLCAS

	Pola Tanam	Keterangan
1	<i>Monokultur jagung - jagung</i>	Tanpa pemupukan
2	<i>Monokultur jagung - jagung</i>	Dipupuk N dosis 90 kg ha ⁻¹ pada setiap musim tanam jagung
3	Budi daya pagar : Petaian + Jagung - jagung	Tanpa pemupukan
4	Budi daya pagar : Petaian + Jagung - jagung	Dipupuk N dosis 90 kg ha ⁻¹ pada setiap musim tanam jagung

Keterangan: (+) Tumpang sari; (-) diikuti

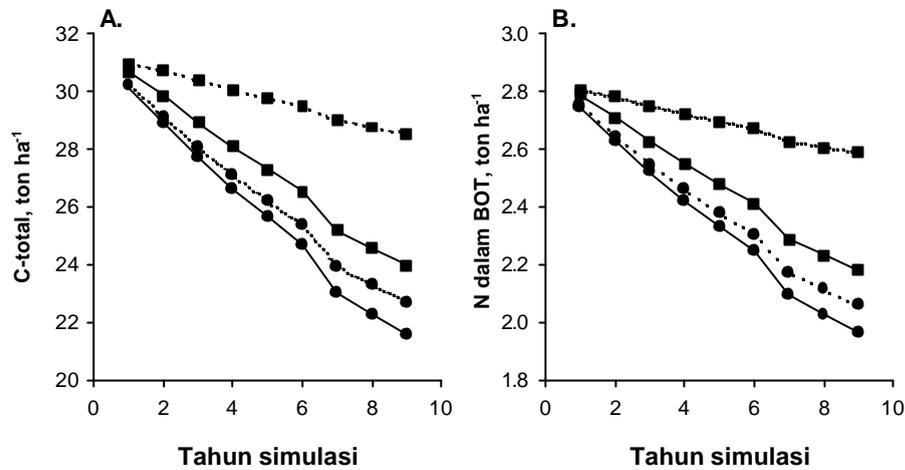
Pada musim tanam pertama (MT1) jagung ditanam pada tanggal 14-12-97, dan pada musim tanam kedua (MT2) ditanam pada tanggal 27-03-1998.

Keluaran simulasi

Pendugaan neraca karbon (C)

Penambahan bahan organik secara terus menerus dapat mempertahankan kandungan bahan organik dalam tanah: lebih banyak bahan organik yang ditambahkan, lebih 'dingin' tanah tersebut. Hasil simulasi menunjukkan bahwa terjadi penurunan bahan organik tanah (C dan

N tanah, Gambar 8A dan B) dari tahun ke tahun. Sistem budidaya pagar dapat memperlambat dan memperkecil penurunan tersebut, terutama jika dikombinasikan dengan pemupukan N. Namun, sistem ini tetap tidak dapat mempertahankan kandungan bahan organik kembali ke kondisi seperti hutan.



Gambar 8. Trend kandungan C-total (A) dan N-organik (B) dalam tanah pada sistem pola tanam (●) sistem monokultur dan (■) sistem budidaya pagar; perlakuan (—) tanpa dan (⋯) dengan pemupukan N 90 kg ha⁻¹.

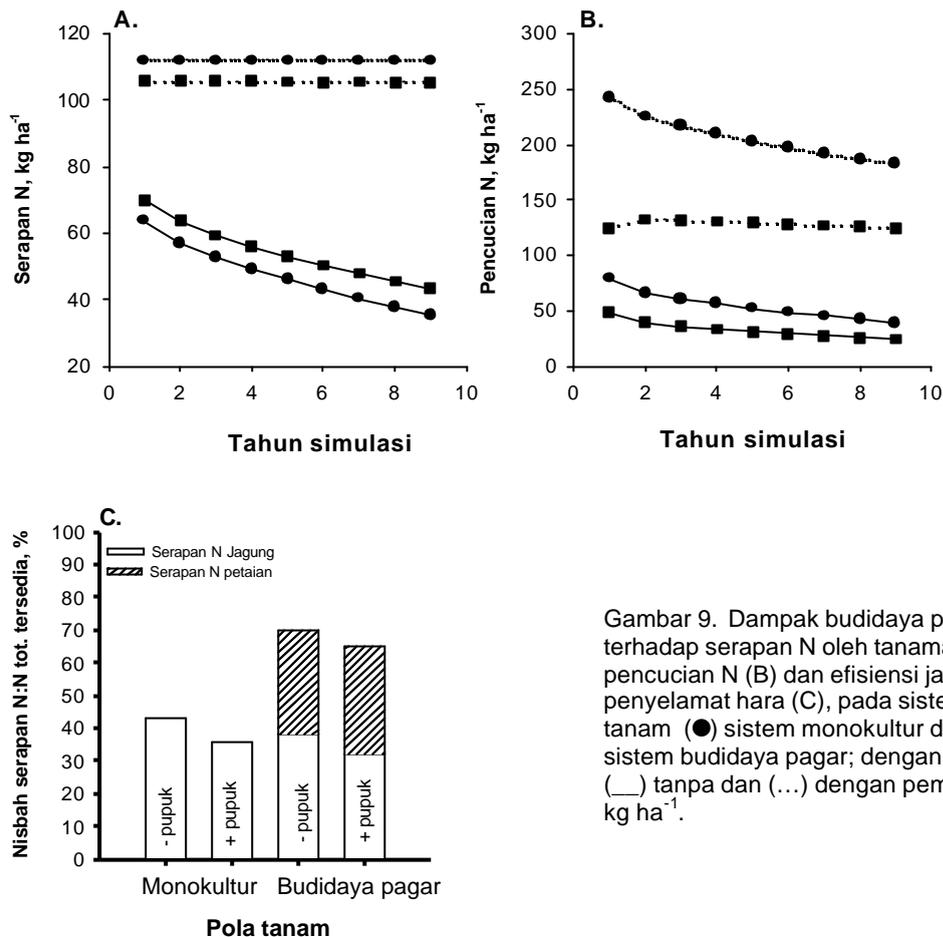
Pendugaan neraca N

Bila tidak ada usaha pemupukan, serapan N tanaman jagung pada sistem budidaya pagar lebih tinggi dari pada sistem monokultur. Namun bila ada usaha pemupukan, jagung menyerap unsur N lebih banyak pada sistem monokultur dibandingkan pada sistem budidaya pagar (Gambar 9A). Kesimpulan yang menarik dari contoh ini adalah pemupukan N pada sistem budidaya pagar justru merugikan tanaman jagung.

Pencucian N terbesar terjadi pada sistem monokultur dengan usaha pemupukan (Gambar 9B). Sistem budidaya pagar mampu menurunkan pencucian N sebesar 40% dari jumlah N tercuci pada sistem monokultur, baik dengan maupun tanpa pemupukan N. Pengaruh seperti inilah yang dinamakan 'fungsi jaring penyelamat hara', seperti yang didiskusikan sebelumnya.

Jika kita membandingkan jumlah N yang dapat diserap tanaman dengan jumlah N yang tersedia selama musim tanam (Gambar 9C), maka dapat dilihat bahwa pada sistem monokultur jagung hanya dapat menyerap sekitar 43 % N tersedia jika tanpa pemupukan, dan 36% saja jika diberi pupuk N.

Pada sistem budidaya pagar, jagung dapat menyerap sekitar 38% N tersedia jika tanpa pemupukan, dan sekitar 32% jika diberi pupuk N. Tanaman pagar menyerap 33% N tersedia, baik dengan maupun tanpa pemupukan. Dengan demikian, jumlah total yang dapat diserap tanaman meningkat dari 36% (dengan pupuk) dan 43% (tanpa pupuk) pada sistem monokultur menjadi 65% (dengan pupuk) dan 70% (tanpa pupuk) pada sistem budidaya pagar. Kehilangan unsur hara N melalui pencucian yang dapat diturunkan dengan sistem budidaya pagar adalah 30-57% jika tanpa pemupukan, dan 35-64% jika diberi pupuk.



Gambar 9. Dampak budidaya pagar terhadap serapan N oleh tanaman (A), pencucian N (B) dan efisiensi jaring penyelamat hara (C), pada sistem pola tanam (●) sistem monokultur dan (■) sistem budidaya pagar; dengan perlakuan (□) tanpa dan (...) dengan pemupukan N 90 kg ha⁻¹.

Penutup

Dalam sistem agroforestri, siklus hara dan karbon lebih bersifat tertutup dibandingkan sistem pertanian tanaman semusim secara monokultur. Penambahan bahan organik oleh pohon dapat berasal dari bagian tajuk di atas tanah maupun bagian akar di bawah tanah. Memasukkan komponen pohon ke dalam sistem pertanian monokultur akan menambah unsur hara dan karbon dalam sistem tersebut. Peningkatan kandungan karbon dan unsur lain selain merupakan hasil dekomposisi serasah dan akar pohon, juga terkait dengan fungsi pohon sebagai jaring penyelamat dan pemompa hara, sehingga mengurangi jumlah hara yang hilang.

Bahan Bacaan

- Hairiah K, Widiyanto, Utami SR, Suprayogo D, Sunaryo, Sitompul SM, Lusiana B, Mulia R, van Noordwijk M dan Cadisch G, 2000. Pengelolaan Tanah Masam Secara Biologi: Refleksi Pengalaman dari Lampung Utara. ICRAF SE Asia, Bogor, 182 p.
- Hairiah K, Van Noordwijk M, Santoso B and Syekhfani MS, 1992. Biomass production and root distribution of eight trees and their potential for hedgerow intercropping on an ultisol in Lampung. AGRIVITA 15: 54-68.
- Hairiah K, Van Noordwijk M and Cadisch G, 2000. Carbon and Nitrogen balance of three cropping systems in N. Lampung. Neth.J. Agric. Sci. 48(2000): 3-17.

- Handayanto E, 1994. Nitrogen mineralization from legume tree prunings of different quality. PhD thesis University of London, 230 p.
- Nair PKR, Buresh RJ, Mugendi DN and Latt CR, 1999. Nutrient cycling in tropical agroforestry systems: Myths and Science. Dalam: Buck L E, Lassoie J P, Fernandez ECM (eds.) Agroforestry in sustainable agricultural systems. Lewis Publisher. pp 1-31.
- Mayers RJK, Palm CA, Cuevas E, Gunatilleke IUN and Brossard M, 1994. In: Woomer P L and Swift M J, 1994. The Biological Management of Tropical Soil Fertility. TSBF. pp 81-116.
- Rowe E, Hairiah K, Giller KE, Van Noordwijk M and Cadisch G, 1999. Testing the "safety-net" role of hedgerow tree roots by ¹⁵N placement at different soil depths. Agroforestry Systems. Agroforestry Systems 43(1-3):81-93. Kluwer Academic Publisher and ICRAF.
- Suprayogo D, Hairiah K, Van Noordwijk M, Giller K and Cadisch G, 1999. The effectiveness of hedgerow cropping system in reducing mineral N-leaching in Ultisol. Dalam: C Ginting, A Gafur, FX Susilo, AK Salam, A Karyanto, S D Utomo, M Kamal, J Lumbanraja and Z Abidin (eds.). Proc. Int. Seminar toward Sustainable Agriculture in the Humid Tropics Facing 21st Century UNILA, Lampung. p. 96 - 106.
- Van der Heide J, Setijono S, Syekhfani MS, Flach EN, Hairiah K, Ismunandar S, Sitompul SM and Van Noordwijk M, 1992. Can low external input cropping systems on acid upland soils in the humid tropics be sustainable? Backgrounds of the UniBraw/IB Nitrogen management project in Bunga Mayang (Sungkai Selatan, Kotabumi, N. Lampung, S. Sumatera, Indonesia). AGRIVITA 15: 1-10
- Van Noordwijk M, Hairiah K, Lusiana B and Cadisch G, 1998. Tree-soil-crop interactions in sequential and simultaneous agroforestry systems. Dalam: Bergstrom L and Kirchmann H (eds.). Carbon and nutrient dynamics in natural and agricultural tropical ecosystems. CAB International, Wallingford, UK. pp 173-191.
- Van Noordwijk M and Lusiana B, 1999. WANULCAS 1.2. Backgrounds of a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems. ICRAF SE. Asia, Bogor.
- Wasrin UR, Setiabudhi, dan Putera AE, 1997. Analisis vegetasi dan sistem pengelolaan pangkalan data di Lampung dan Jambi. ASB II.

NERACA AIR DALAM SISTEM AGROFORESTRI

Didik Suprayogo, Widiyanto, Betha Lusiana dan Meine van Noordwijk

TUJUAN

- Memahami siklus air dan kompetisi air dalam sistem agroforestri.
- Mengetahui kebutuhan air untuk pohon dan tanaman semusim dalam sistem agroforestri.
- Memahami bagaimana pohon dan tanaman semusim berbagi air dalam sistem agroforestri.
- Mempelajari pengaruh kekurangan air terhadap produksi tanaman dalam sistem agroforestri

1. Pendahuluan: Keseimbangan Air Sistem Agroforestri

Air merupakan salah satu komponen penting yang dibutuhkan oleh tanaman baik pohon maupun semusim untuk tumbuh, berkembang dan berproduksi. Air yang dapat diserap tanaman adalah air yang berada dalam pori-pori tanah di lapisan perakaran. Akar tanaman dari semua komponen agroforestri menyerap air dari tandon air yang sama dan pada kapasitas yang terbatas. Bila jumlah air dalam tandon berkurang terjadilah perebutan antara akar-akar berbagai jenis tanaman yang ada untuk mengambil air. Dalam hal ini terjadi kompetisi untuk mendapatkan air guna mempertahankan pertumbuhan masing-masing jenis tanaman.

Lapisan tanah di daerah perakaran sebagai tandon (reservoir) yang menyimpan air dapat diisi ulang melalui peristiwa masuknya air dari tempat lain, misalnya hujan, irigasi, aliran lateral atau aliran ke atas (kapiler). Masuknya air hujan dan irigasi ke lapisan perakaran melalui peristiwa yang disebut **infiltrasi**. Aliran air masuk dan ke luar lapisan perakaran ini dinamakan **siklus air**. Besaran tiap komponen siklus dapat diukur dan digabungkan satu dengan yang lain sehingga menghasilkan neraca air atau keseimbangan air.

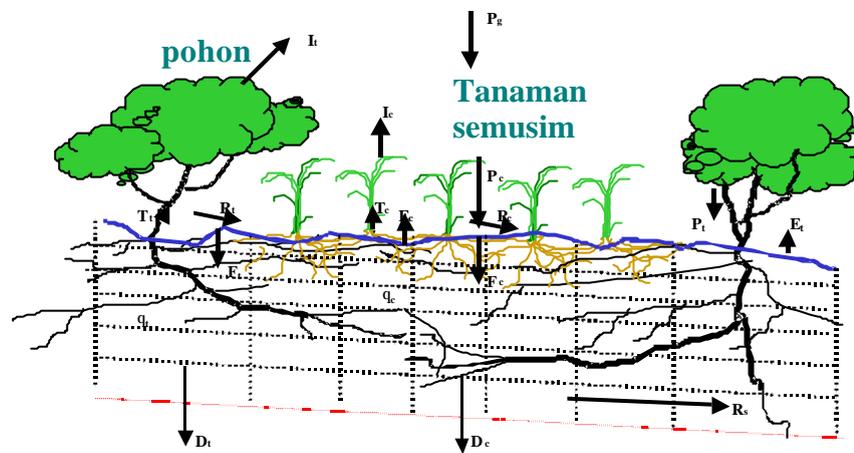
Beberapa sifat tanah yang merupakan komponen-komponen neraca air, misalnya kapasitas menyimpan air (jumlah ruang pori), infiltrasi, kemantapan pori sangat dipengaruhi oleh macam penggunaan lahan atau jenis dan susunan tanaman yang tumbuh di tanah tersebut. Jadi jenis-jenis pohon atau tanaman semusim yang ditanam pada suatu bidang tanah dapat mempengaruhi siklus dan keseimbangan air pada sistem tersebut. Sebaliknya siklus dan keseimbangan air dalam sistem ini pada gilirannya juga mempengaruhi kompetisi antara komponen tanaman yang ada. Dalam Gambar 1 disajikan ilustrasi skematis dari siklus air dalam suatu sistem agroforestri dan beberapa komponen penting yang terlibat dalam siklus dan keseimbangan air.

Curah hujan yang jatuh pada suatu kawasan (Pg), sebagian akan ditahan oleh tajuk pohon (It), dan sebagian lagi oleh tajuk tanaman semusim (Ic), dan lainnya lolos ke permukaan

tanah di bawah pohon (P_t) dan di bawah tanaman semusim (P_c). Air yang ditahan oleh tajuk pohon dan tanaman semusim sebagian besar menguap sehingga tidak berpengaruh kepada simpanan (cadangan) air dalam tanah. Tajuk pohon dan tanaman semusim yang berbeda mengakibatkan perbedaan jumlah air yang ditahan tajuk kedua jenis tanaman itu. Akibatnya jumlah air yang lolos dan mencapai permukaan tanah di bawah pohon dan di bawah tanaman semusim juga berbeda.

Air hujan yang lolos dari tajuk tanaman akan mencapai permukaan tanah (P_t dan P_c) dan sebagian masuk ke dalam tanah melalui proses infiltrasi (F_t dan F_c), sebagian lagi mengalir di permukaan tanah sebagai limpasan permukaan (R_t dan R_c). Sifat-sifat tanah di bawah pohon dan tanaman semusim dan jumlah air yang jatuh di bawah kedua tanaman yang berbeda menyebabkan kecepatan infiltrasi (F_t dan F_c) dan limpasan permukaan di bawah tanaman semusim (R_c) dan pohon (R_t) juga berbeda. Dalam kondisi tertentu infiltrasi di bawah pohon bisa cukup tinggi sehingga tidak hanya cukup untuk menurunkan R_t menjadi nol (tidak ada limpasan permukaan), tetapi mampu menampung limpasan permukaan dari areal di bawah tanaman semusim (R_c).

Gambar 1. Skema siklus air dalam sistem agroforestri sederhana pada tanah miring.



Keterangan Gambar 1:

- | | |
|---|---|
| P_g = Curah Hujan Total | R_s = Aliran Air Lateral |
| I_t = Intersepsi Pohon | I_c = Intersepsi Tanaman Semusim |
| P_t = Hujan Lolos Tajuk Pohon | P_c = Hujan Lolos Tajuk Tanaman Semusim |
| F_t = Kecepatan Infiltrasi di bawah Pohon | F_c = Kecepatan Infiltrasi di bawah Tanaman Semusim |
| R_t = Limpasan Permukaan di bawah Pohon | R_c = Limpasan Permukaan di bawah Tanaman Semusim |
| E_t = Evaporasi Tanah (dari bawah pohon) | E_c = Evaporasi Tanah (dari bawah tanaman semusim) |
| q_t = Kadar Air Tanah (dibawah pohon) | q_c = Kadar Air Tanah (dibawah tanaman semusim) |
| T_t = Transpirasi Pohon | T_c = Transpirasi Tanaman Semusim |
| D_t = Drainasi di bawah Pohon | D_c = Drainasi di bawah Tanaman Semusim |

Air yang berada di permukaan tanah akan menguap (evaporasi) dengan kecepatan E_t di bawah pohon dan E_c di bawah tanaman semusim. Kecepatan (E_t dan E_c) ini berbeda karena adanya perbedaan kerapatan penutupan tajuk pohon dan tanaman semusim. Evaporasi akan terus berlangsung selama ada suplai air dari lapisan di bawahnya.

Besarnya kandungan air tanah pada zona di bawah pohon (θ_t), dan di bawah tanaman semusim (θ_c) bisa berbeda pula. Kadar air tanah ditentukan oleh masukan yaitu infiltrasi (F) di permukaan tanah dan keluaran yang terdiri dari evaporasi (E), transpirasi (T) dan drainasi (D). Seperti telah dibahas bahwa komponen-komponen neraca air di bawah pohon bisa berbeda dengan yang ada di bawah tanaman semusim, sehingga hasil akhir berupa simpanan air dalam tanah juga berbeda antara di bawah pohon dan di bawah tanaman semusim.

Kesetimbangan air dalam sistem agroforestri sederhana yang terdiri dari kombinasi barisan pohon dan barisan tanaman semusim dapat diringkas dalam sebuah persamaan berikut :

$$I(q_t+q_c) = P_g - (I_t+I_c) - (D_t+D_c) - (R_t+R_c) - (E_t+E_c) - (T_t+T_c)$$

Kombinasi antara pohon dengan tanaman semusim atau rerumputan yang terjadi dalam praktek agroforestri di lapangan adalah sangat beragam. Dalam sistem agroforestri yang demikian kompleks sangat sulit memahami dengan jelas apa yang terjadi dengan nasib air hujan yang jatuh pada sistem ini. Pemahaman neraca air pada sistem agroforestri sederhana diharapkan dapat membantu menjelaskan nasib air hujan yang jatuh pada sistem agroforestri itu digunakan oleh pohon dan tanaman semusim atau dialirkan lewat permukaan atau di dalam tanah. Beberapa pertanyaan berikut ini mungkin dapat dijawab melalui pemahaman tentang neraca air dari sebuah sistem agroforestri :

- Apakah pohon lebih banyak memanfaatkan air dibanding tanaman semusim?
- Bagaimana pohon berbagi air dengan tanaman semusim di dalam profil tanah dan dari waktu ke waktu. Apakah mereka saling menguntungkan?
- Bagaimana perbedaan musim mempengaruhi sistem ini?
- Bagaimana pembatas ketersediaan air mempengaruhi produksi tanaman?
- Alih guna lahan dari hutan menjadi sistem agroforestri mempengaruhi aliran air sungai di daerah hilir. Bagaimana mekanismenya?

Pertanyaan-pertanyaan tersebut dapat dijawab bila berbagai komponen masukan dan keluaran dalam kesetimbangan air diukur secara akurat. Berbagai metode untuk pengukuran komponen masukan dan keluaran tersebut pada saat ini sudah tersedia (Ong *et al.*, 1996, Wallace, 1996, Suprayogo, 2000). Pengukuran komponen masukan dan keluaran dalam kesetimbangan air bukan merupakan pekerjaan yang mudah, kendati hanya pada praktek agroforestri yang sederhana. Pengukuran ini memerlukan biaya yang relatif mahal, tenaga yang banyak dan ketrampilan yang tinggi serta waktu yang lama. Hasil pengukuran masukan-keluaran dalam kesetimbangan air diperlukan untuk berbagai keperluan misalnya pengujian atau *validasi* model kesetimbangan air, pengujian asumsi dan hipotesis tentang manfaat campuran pepohonan dan tanaman semusim yang tumbuh diberbagai tempat. **Model WaNuLCAS** yang dikembangkan oleh Van Noordwijk dan Lusiana (1999) merupakan salah satu pendekatan yang menyediakan kebutuhan untuk memahami komponen masukan dan keluaran dalam kesetimbangan air pada sistem agroforestri sederhana.

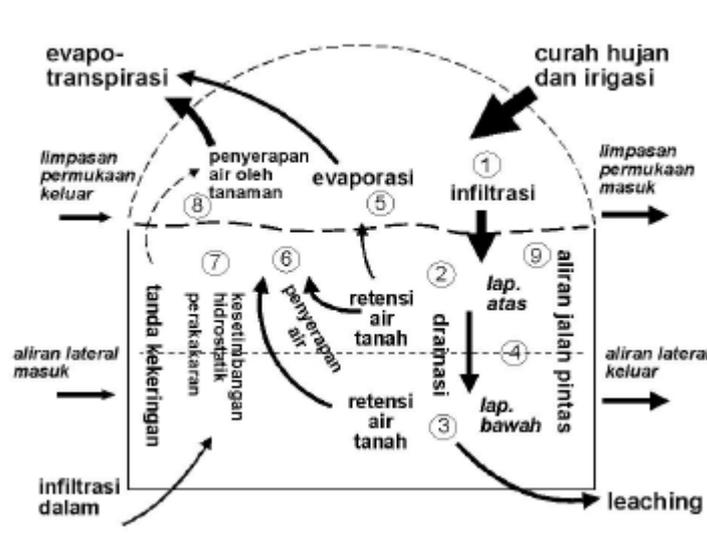
2. Kesetimbangan Air menurut Model WaNuLCAS

2.1 Simpanan air tanah, infiltrasi dan evaporasi

Kesetimbangan air dalam suatu sistem tanah-tanaman dapat digambarkan melalui sejumlah proses aliran air yang kejadiannya berlangsung dalam satuan waktu yang berbeda-beda. Beberapa proses aliran air (Gambar 2) dan kisaran waktu kejadiannya yang dinilai penting adalah:

1. Hujan atau irigasi (mungkin dengan tambahan aliran permukaan yang masuk ke petak atau *run-on*) dan pembagiannya menjadi infiltrasi dan limpasan permukaan (dan/atau genangan di permukaan) dalam skala waktu detik sampai menit.

2. Infiltrasi kedalam tanah dan drainasi (pematusan) dari dalam tanah melalui lapisan-lapisan dalam tanah dan/atau lewat jalan pintas seperti retakan yang dinamakan *by-pass flow* dalam skala waktu menit sampai jam.
3. Drainasi lanjutan dan aliran bertahap untuk menuju kepada kesetimbangan hidrostatik dalam skala waktu jam sampai hari.
4. Pengaliran larutan tanah antara lapisan-lapisan tanah melalui aliran massa (*mass flow*)
5. Penguapan atau evaporasi dari permukaan tanah dalam skala waktu jam sampai hari.
6. Penyerapan air oleh tanaman dalam skala waktu jam hingga hari, tetapi sebagian besar terjadi pada siang hari ketika stomata terbuka.
7. Kesetimbangan hidrostatik melalui sistem perakaran dalam skala waktu jam hingga hari, tetapi hampir semua terjadi pada malam hari pada saat transpirasi nyaris tidak terjadi.
8. Pengendali hormonal terhadap transpirasi (memberi tanda terjadinya kekurangan air) dalam skala waktu jam hingga minggu.
9. Perubahan volume ruangan pori makro (dan hal lain yang berkaitan) akibat penutupan dan pembukaan rekahan (retakan) tanah yang mengembang dan mengerut serta pembentukan dan penghancuran pori makro oleh hewan makro dan akar. Peristiwa ini terjadi dalam skala waktu hari hingga minggu. Pengaruh utama kejadian adalah terhadap aliran air melalui jalan pintas (*by-pass flow*) dan penghambatan proses pencucian unsur hara.



Gambar 2. Bagian-bagian dari kesetimbangan air dalam model WaNuLCAS (1) Infiltrasi, (2,3,4) Redistribusi air dan larutan dalam profil tanah, pengisian kembali air tanah (2) dan drainasi atau pencucian kelebihan air dari dasar profil tanah, (5) Evaporasi tanah, (6) Penyerapan air oleh akar pohon dan tanaman semusim, (7) Kesetimbangan hidraulik melalui akar pohon, (8). Tanda (*signal*) kekeringan yang mempengaruhi pembagian air ke batang/akar, (9) Aliran larutan lewat jalan pintas (*bypass flow*)

Model WaNuLCAS ini menggabungkan proses-proses yang disebutkan dalam butir 1 sampai dengan butir 7, di mana semuanya dipadukan dalam skala waktu harian pada petakan kecil (*patch scale*). Ringkasan keluaran neraca air hasil simulasi WaNuLCAS dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Keseimbangan air pada petakan kecil (*patch scale*) dalam WaNuLCAS

Masuk	Keluar
Kandungan air tanah awal untuk semua <i>zona</i> dan lapisan	Kandungan air tanah akhir untuk semua <i>zona</i> dan lapisan
Limpasan permukaan masuk ke petakan	Limpasan permukaan keluar dari petakan
Aliran lateral masuk	Drainasi dari dasar profil tanah dan aliran lateral keluar
Curah hujan	Evaporasi permukaan tanah
Irigasi (sebagai hujan tambahan)	Evaporasi air yang terintersepsi tajuk tanaman
	Transpirasi oleh pohon
	Transpirasi oleh tanaman

Infiltrasi, yang besarnya tergantung dari intensitas hujan, kemiringan lahan dan kandungan air tanah, secara empiris dapat dibagi pada skala petak kecil atau *patch scale*.

Limpasan permukaan keluar dan masuk batas *zona-zona* yang ada dalam model WaNuLCAS menyebabkan terjadinya re-distribusi air diantara *zona-zona* tersebut.

Infiltrasi didekati dengan model “*tipping bucket*”. Dalam model seperti ini lapisan tanah paling atas diisi air hingga mencapai kapasitas lapang, selanjutnya mengisi lapisan dibawahnya dan seterusnya. Kondisi kapasitas lapangan diperhitungkan dengan melihat kurva karakteristik air tanah (kurva pF).

Penguapan atau evaporasi tanah tergantung pada penutupan permukaan tanah (didasarkan pada LAI pohon dan tanaman semusim) dan kandungan air dalam lapisan tanah atas. Penguapan tanah berhenti bila potensial air di lapisan tanah atas mencapai – 16.000 cm.

2.2 Serapan air

Penyerapan air oleh tanaman dikendalikan oleh (a) kebutuhan untuk transpirasi, (b) dipengaruhi oleh kerapatan total panjang akar dan (c) kandungan air tanah di lapisan jelajah akar tanaman. Cara perhitungan yang dipergunakan oleh De Willigen & Van Noordwijk (1987, 1991) didasarkan pada prosedur iteratif. Persamaan tahanan tanah + tanaman sebagai fungsi dari kecepatan aliran dan persamaan kecepatan aliran sebagai fungsi dari tahanan-tahanan yang terkait dipecahkan secara bersamaan (simultan).

Potensial air tanaman dapat dihitung dari potensial air tanah. Potensial air tanah merupakan rata-rata tertimbang seluruh *zona* dan lapisan yang dihitung berdasarkan kerapatan total panjang akar (L_{rv}) setempat dikurangi potensial untuk mengatasi tahanan akar pada saat kebutuhan transpirasi dapat tercukupi, dan bagian untuk mengatasi tahanan tanah (10 % dari potensial air tanah).

Langkah-langkah peristiwa yang terjadi dalam pemodelan serapan air dapat disederhanakan menjadi 3 langkah berikut:

1. Permintaan transpirasi potensial (E_p) ditaksir dari produksi berat kering potensial (sebagai masukan untuk WaNuLCAS yang dihitung dari model lain). Permintaan transpirasi memperhitungkan faktor naungan dan LAI, dikalikan efisiensi penggunaan air. Efisiensi penggunaan air ($CW_TranspRatio$) merupakan masukan untuk model yang mencerminkan iklim dan jenis tanaman.

2. Kecepatan penyerapan air potensial untuk semua lapisan i dihitung atas dasar potensial air tanah (h_sI), potensial rhizosfer (h_{rh}) dan potensial aliran matriks (F). Potensial aliran matriks adalah konduktivitas hidraulik tak jenuh yang dapat digunakan untuk menduga kecepatan aliran maksimum yang dapat terjadi dalam tanah (De Willigen & Van Noordwijk, 1994), yang memperhitungkan bahwa semakin kering tanah semakin sulit air untuk mengalir melalui ruangan pori yang berkurang airnya.
3. Menghitung 'faktor cekaman air' dari penyerapan air sebagai bagian permintaan transpirasi potensial. Pertumbuhan riil didasarkan pada faktor 'cekaman air' dan 'cekaman hara' minimum dan pertumbuhan potensial.

Box berikut memperlihatkan contoh hasil simulasi dengan WaNuLCAS pada sistem tanaman pagar di Lampung yang mengilustrasikan pengaruh kerapatan total panjang akar terhadap penyerapan air (Smith *et al.*, *in press*).

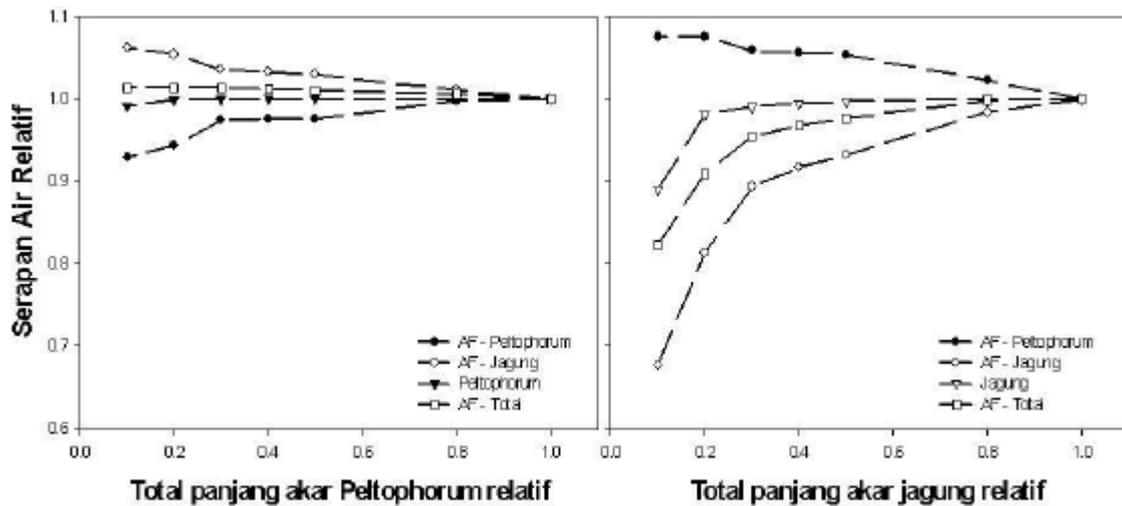
Contoh Kasus 1: Simulasi penyerapan air pada sistem tanaman pagar dibanding monokultur pohon.

Berikut ini adalah contoh penggunaan model WaNuLCAS untuk mensimulasikan penyerapan air oleh pohon (*Peltophorum dasyrrhachis*) dan tanaman semusim (jagung) pada sistem tanaman pagar di Pakuan Ratu, Lampung. Rata-rata curah hujan tahunan yang normal di Lampung adalah 3100 mm. Simulasi ini mengilustrasikan musim tanam kedua (bulan Maret – Mei) pada kondisi akhir musim hujan dimana curah hujan hanyalah 20% dari kondisi normal. Tanah diasumsikan memiliki kandungan hara (N dan P) yang cukup sehingga sistem tidak mempunyai masalah kekurangan unsur hara. Dalam simulasi ini akan dilihat bagaimana perubahan kerapatan total panjang akar pohon atau tanaman semusim mempengaruhi pembagian serapan air oleh pohon dan tanaman semusim. Hasil simulasi pada sistem tanaman pagar ini juga dibandingkan dengan kondisi monokultur peltophorum dan jagung, seperti yang dapat dilihat di Gambar 3.

Pada sistem monokultur peltophorum, berkurangnya kerapatan total panjang akar terindikasi kurang mempengaruhi serapan air oleh peltophorum. Sebaliknya apabila hal yang sama terjadi pada sistem tanaman pagar, maka serapan air oleh Peltophotrum akan berkurang dan serapan air oleh jagung akan meningkat (Gambar 3a). Hal ini menunjukkan bahwa pada sistem monokultur peltophorum, penurunan potensial rhizophor tidak cukup kuat untuk menurunkan serapan air oleh peltophorum.

Perubahan kerapatan panjang akar jagung mengakibatkan perubahan yang lebih besar terhadap serapan air dalam sistem (Gambar 3b). Air yang tidak dapat diserap oleh jagung akibat penurunan kerapatan panjang akarnya tidak seluruhnya dapat diserap oleh akar Peltophorum, sehingga pemanfaatan air dari sistem berkurang.

Contoh Kasus 1 (lanjutan)



Gambar 3. Hasil simulasi WaNuLCAS untuk mengamati perubahan kerapatan panjang akar terhadap serapan air oleh pohon (*Peltophorum*) dan tanaman semusim (jagung) pada sistem tanaman pagar. Serapan air dinyatakan relatif terhadap nilai yang diperoleh apabila kerapatan akar pada kondisi maksimum. AF-Peltophorum = serapan air oleh Peltophorum pada situasi sistem tanaman pagar, AF-Jagung = serapan air oleh jagung pada situasi sistem tanaman pagar, AF – Total = serapan air oleh jagung dan Peltophorum pada situasi sistem tanaman pagar.

2.3 'Run-on dan Run-off

Limpasan permukaan masuk (*run on*) dan keluar (*run off*) dari suatu petak lahan diperhitungkan dengan cara yang sama dalam model ini. Konduktivitas (daya hantar air) menjadi tak-terbatas bilamana kemiringan lahan sudah melebihi 0. Nilai *run-on* diperhitungkan sebagai bagian *run-off* dari lereng atas yang masuk ke petak lahan yang disimulasi. Fraksi *run-off* dapat disimulasi, tergantung pada kandungan air dalam profil tanah. Ada dua hal penting yang menentukan limpasan permukaan :

- Bila curah hujan harian ditambah *run-on* melebihi kecepatan infiltrasi maksimum harian.
- Bila curah hujan harian ditambah *run-on* melebihi kapasitas penyimpanan air masuk dan keluar dari lapisan tanah di bawah permukaan.

Limpasan permukaan yang pertama biasanya dipengaruhi oleh sifat permukaan tanah misalnya adanya kerak (*crusting*) dan sifat anti-air (*hydro-phobi*). Jenis yang kedua tergantung kedalaman profil dan konduktivitas hidraulik lapisan bawah.

Situasi peralihan yaitu limpasan bawah permukaan (*subsurface run-off*) bisa terjadi secara *top down* (mulai di lapisan yang lebih atas sebelum lapisan bawahnya) atau *bottom-up* (dimulai dari lapisan bawah), tergantung pada sifat profil tanah pada saat terjadi aliran air jenuh (konduktivitas hidraulik jenuh).

2.4 Dinamika Pembentukan dan Penurunan Ruang Pori Makro

Dinamika penambahan dan penurunan jumlah ruangan pori makro berakibat pada nilai berat isi matriks tanah, sepanjang massa padatan tanah tidak berubah. Pemadatan matriks tanah meningkatkan konduktivitas hidraulik tak jenuh (*unsaturated hydraulic conductivity*), sedangkan adanya ruangan pori makro meningkatkan konduktivitas hidraulik jenuh. Jika bisa menggunakan fungsi *pedotransfer*, maka perubahan berat isi dan mungkin kandungan bahan organik pada tanah dengan tekstur yang sama dapat dipakai untuk menaksir perubahan sifat retensi air dan konduktivitas hidraulik jenuh dengan mudah jika dinamika pori makro sudah diketahui.

Jika pori makro didominasi rekahan tanah, maka perlu diketahui sifat pembengkakan dan pengerutan tanah yang dipengaruhi oleh kadar air tanah. Jika pori makro didominasi oleh akar, cacing tanah dan/atau hewan makro lainnya, maka yang perlu diketahui adalah kerapatan populasi dan aktivitasnya, fraksi pori makro yang tersumbat sementara oleh akar dan kecepatan penutupan kembali pori makro akibat pergerakan material tanah secara internal dan/atau akibat aktivitas organisme (*bioperturbation*).

Dalam model WaNuCAS disediakan pilihan untuk simulasi dinamika struktur pori makro. Nilai konduktivitas hidraulik jenuh awal dapat ditetapkan sendiri atau menggunakan nilai yang tersedia dari hasil pendugaan melalui fungsi *pedotransfer*. Selama proses simulasi nilai tersebut cenderung menuju ke nilai hasil pendugaan (*default*). Nilai *pedotransfer* ditetapkan sebagai *default* berasal dari pengukuran contoh tanah dalam silinder kecil. Cacing dapat meningkatkan konduktivitas hidraulik jenuh di atas nilai *default*, tetapi ini sangat tergantung dari “jenis makanan untuk cacing” yang dinyatakan melalui struktur dan sifat metabolik bahan organik sebagai masukan model dan kedalaman lapisan yang bisa dipengaruhi oleh aktivitas cacing pada lokasi tertentu. Perubahan struktur tanah ini akan mengalami penurunan secara berangsur bila kondisi yang ada tidak dipertahankan.

Struktur model saat ini sangat sensitif terhadap perubahan nilai konduktivitas hidraulik jenuh, paling tidak dalam kisaran parameter tertentu yang tergantung dari resim curah hujan dan simpanan air tanah. Hal ini relatif mempermudah dalam rangka membuat konduktivitas hidraulik jenuh menjadi dinamis. Contoh : adanya sistem saluran yang terbentuk oleh akar lapuk warisan hutan di masa lalu (*root channel* = liang akar), yang mengalami kerusakan secara eksponensial dan laju pembentukan saluran baru oleh aktivitas akar (pohon) dan/atau cacing pada suatu lapisan tanah. Dengan demikian dampak aktivitas biota tanah terhadap struktur makro dapat dikaji lebih lanjut.

3 Membandingkan Hasil Simulasi WaNuLCAS dengan Hasil Pengukuran Lapangan

Berikut ini diuraikan sebuah contoh pengujian hasil simulasi WaNuLCAS dengan cara membandingkannya dengan hasil pengukuran di lapangan yaitu di desa Karta, Pakuan Ratu, Kabupaten Lampung Utara (4° 30' S, 104° 98' E). Data kesuburan tanah dan data iklim lokasi ini diperoleh dari proyek BMSF. Jenis tanah di lokasi ini adalah *Grossarenic Kandiuult* (Van der Heide *et al.*, 1992). Data iklim yang digunakan diperoleh pada musim tanam antara bulan September 1997 sampai dengan September 1998. Lokasi ini termasuk daerah tropika basah. Masalah pencucian hara dan penurunan kandungan bahan organik merupakan hal yang umum terjadi di lahan pertanian di daerah ini. Salah satu teknik alternatif pengelolaan tanah yang dianjurkan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah sistem tumpangsari antara pohon yang berakar dalam dengan tanaman semusim yang umumnya berakar lebih dangkal. Pohon ditanam berbaris sebagai pagar sementara lorong diantara barisan pohon

ditanami tanaman semusim (jagung-kacang tanah). Jenis pohon yang ditanam sebagai pagar adalah petaian (*Peltophorum*) dan gamal (*Gliricidia*) dengan jarak tanam 4 x 0.5 m. Untuk memahami pengaruh penyisipan pohon diantara tanaman semusim, maka budidaya pagar ini dibandingkan dengan tanam semusim monokultur. Pupuk N diberikan pada ketiga pola tanam tersebut dengan dosis 30 kg ha⁻¹ diberikan pada saat jagung berumur 7 hari, dan 60 kg ha⁻¹ diberikan pada saat jagung berumur satu bulan.

Pengukuran komponen kesetimbangan air (persamaan 1) dilakukan dengan beberapa cara sebagai berikut:

1. Curah hujan (P_g) diperoleh dari data hujan harian yang dicatat dari tanggal 1 Nopember 1997 sampai dengan tanggal 31 Oktober 1998.
2. Limpasan permukaan (R_t+R_c) diukur dari daerah tangkapan seluas 4 m x 6 m dengan menggunakan sistem *tipping bucket*¹(Khan & Ong, 1994). Limpasan permukaan diukur setiap kejadian hujan (selama percobaan terjadi 66 kejadian hujan) dari 14 Januari (30 hari setelah penanaman jagung) s/d 11 Mei 1998 (46 hari setelah penanaman kacang tanah).
3. Perubahan kadar lengas tanah dipantau dengan *neutron probe*²pada kedalaman 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm, 70 cm and 80 cm. Kadar lengas tanah diukur setiap minggu mulai 1 Januari 1998 (17 hari setelah tanam jagung) sampai dengan 29 April 1998 (33 hari setelah penanaman kacang tanah).
4. Evaporasi tanah diukur dengan lisimeter mikro (Boast & Robertson, 1982). Evaporasi tanah diukur setiap 5 hari dari 1 Januari 1998 (17 hari setelah tanam jagung) sampai dengan 29 April 1998 (33 hari setelah tanam kacang tanah).
5. Sensor *heat pulse*³yang dikembangkan oleh Khan dan Ong (1996) digunakan untuk mengukur transpirasi pohon.
6. Transpirasi tanaman tidak diukur secara langsung, tetapi diduga melalui simulasi model CROPWAT model Version 5.1 (Smith, 1991).
7. Intersepsi tajuk pohon dan tanaman semusim, selisih kandungan air dalam tanaman, dan pergerakan air kapiler ke atas diasumsikan nol.
8. Jumlah air drainasi yang keluar dari *zona* perakaran diestimasi dengan kesetimbangan air sebagai berikut:

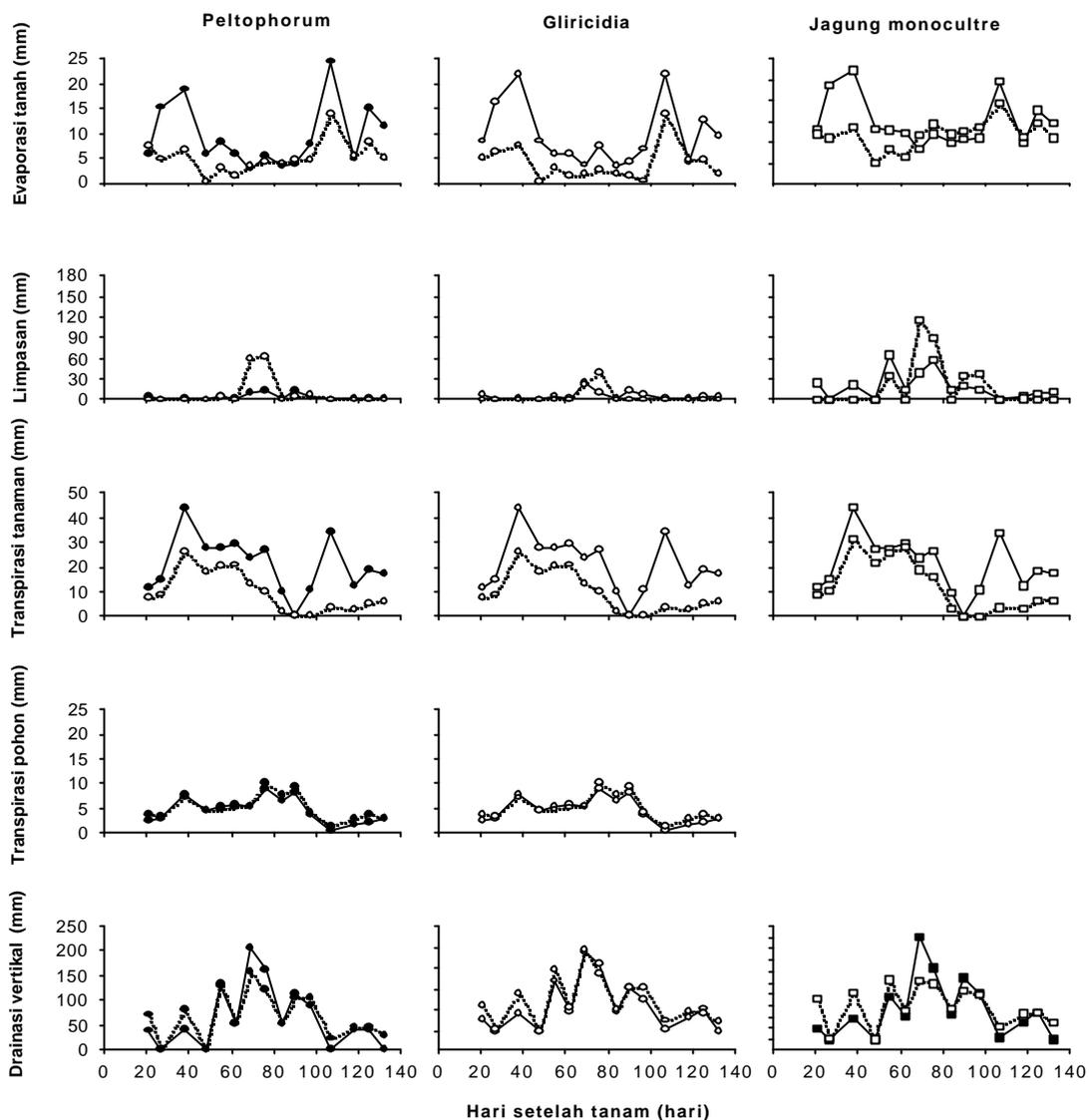
$$(D_t+D_c) = [(P_t+P_c)+(U_t+U_c) - \int(q_t+q_c)] / [\int_{time} + (R_t+R_c) + (E_t+E_c) + (T_t+T_c)] \quad (2)$$

Perbandingan hasil percobaan lapangan yang telah diuraikan di atas dengan hasil simulasi komputer menggunakan model WaNuLCAS disajikan dalam Gambar 4. Hasil simulasi WaNuLCAS terhadap terhadap beberapa komponen kesetimbangan air pada umumnya memiliki kecenderungan dan pola yang sama dengan hasil pengukuran di lapangan. Bila dicermati lebih jauh ternyata hasil simulasi WaNuLCAS terhadap evaporasi tanah dan transpirasi tanaman cenderung lebih rendah (*underestimate*), tetapi sebaliknya limpasan permukaan, transpirasi pohon dan air drainasi cenderung lebih tinggi (*overestimate*).

¹ *Tipping Bucket* adalah suatu alat untuk mengukur curah hujan atau limpasan air dengan cara menadah air ke dalam wadah yang kecil (*bucket*). Wadah ini dapat menampung seluruh isinya dengan sendirinya apabila air telah mencapai berat tertentu. Berapa kali wadah ini menampung isinya menunjukkan jumlah volume air yang masuk ke dalam alat.

² *Neutron probe* adalah suatu alat untuk mengukur kandungan air tanah berdasarkan kemampuan adsorpsi sinar neutron dari suatu sumber radioaktif.

³ *Heat pulse* adalah suatu metode untuk mengukur air yang mengalir dalam batang pohon. Pengukuran didasarkan pada kecepatan panas mengalir dari suatu sumber sensor yang dimasukkan ke dalam batang pohon.



Gambar 4. Dari waktu ke waktu pengukuran (garis tidak terputus) kecuali transpirasi tanaman yang disimulasi dari model CROPWAT, dan disimulasi (garis terputus) oleh WaNuLCAS dari (A) evaporasi tanah (mm), (B) limpasan permukaan (mm), (C) transpirasi tanaman semusim (mm), (D) transpirasi pohon (mm) and (E) drainasi (mm) pada pola tanam yang berbeda dimana (●) = *Peltophorum* (○) = *Gliricidia* dalam sistem tanaman pagar dan (?) = pola tanam monoculture (Suprayogo, 2000).

4. Latihan

Untuk memperdalam pemahaman neraca air dalam sistem agroforestri, WaNuLCAS dapat digunakan untuk simulasi berbagai skenario sistem pola tanam dan pengaturan tata letak antara pohon dan tanaman. Contoh skenario sederhana yang dapat dicoba untuk memahami interaksi pohon dan tanaman semusim terhadap pemanfaatan air dalam sistem agroforestri disajikan di Box di bawah ini. Lebih lanjut, skenario-skenario yang lain dapat disusun dan dikembangkan sesuai dengan kebutuhan masing-masing untuk pemahaman neraca air. Selamat mencoba untuk bersimulasi dengan WaNuLCAS, semakin banyak kita melakukan simulasi akan semakin mendalam pemahaman kita tentang manfaat model untuk memahami fenomena alam dan permasalahan-permasalahan pengelolaan sumberdaya air dalam sistem pertanian pada umumnya.

Tugas: simulasi model

Lakukan simulasi komputer neraca air pada sistem agroforestri dengan model WaNuLCAS. Pilihlah lokasi yang telah memiliki data dasar lengkap dan sudah dimasukkan dalam komputer (tersedia bersama program). Untuk ini bisa dipilih desa Karta, Pakuan Ratu, Lampung ($4^{\circ} 30' S$ dan $104^{\circ} 98' E$) yang merupakan lokasi penelitian Proyek BMSF, dengan jenis tanah Ultisols.

Jawablah beberapa pertanyaan berikut dengan memperhatikan hasil simulasi :

1. Apakah pohon lebih banyak memanfaatkan air dibanding tanaman semusim?
2. Bagaimana pohon berbagi air dengan tanaman semusim didalam profil tanah dan dari waktu ke waktu. Apakah pembagian air ini saling menguntungkan ?
3. Apakah perbedaan musim mempengaruhi sistem ini ?
4. Apa saja pembatas ketersediaan air bagi tanaman dan bagaimana pembatas itu mempengaruhi produksi tanaman ?
5. Bagaimana perubahan sifat aliran sungai yang akan mengisi sebuah waduk di bagian hilir bila terjadi perubahan penggunaan lahan dari sistem "*hutan*" menjadi sistem "*agroforestri*" di daerah hulu tangkapan sungai tersebut ?

Bahan Bacaan

Textbook

- Ong CK, Black CR, Marshall FM and Corlett JE, 1996. Principles of resource capture and utilization of light and water. In: CK Ong and P Huxley (ed.), Tree-crop Interaction: a Physiological Approach. CAB International, Wallingford, UK.
- Hillel, D. 1998. Environmental Soil Physics. Academic Press. UK
- Smith M, 1991. CROPWAT: Irrigation planning and management tool Ver. 5.7. Land and Water Development Divison, FAO, Rome.
- Wallace JS, 1996. The water balance of mixed tree-crop systems. In Ong CK and Huxley P (ed.), Tree-crop Interaction: a Physiological Approach. CAB International, Wallingford, UK.

Journal Ilmiah

- Boast CW and Robertson TM, 1982. A "micro-lysimeter" method for determining evaporation from bare soil: description and laboratory evaluation. Soil Science Society of America Journal 46, 689-696.
- De Willigen P and Van Noordwijk M, 1991. Modeling nutrient uptake: from single roots to complete root systems. In: Penning De Vries FWT, Van Laar HH and Kropff MJ (eds.), Simulation and Systems Analysis for Rice Production (SARP). Simulation Monographs, PUDOC, Wageningen. P 277-295.
- De Willigen P and Van Noordwijk M, 1994. Diffusion and mass flow to a root with constant nutrient demand or behaving as a zero-sink. Soil Sci. 157:162-175.
- Khan AAH and Ong C, 1996. A low cost heat pulse technique for measuring tree root water uptake. Agroforestry forum 7(2), 19-22.

Van der Heide J, Setijono S, Syekhfani MS, Flach EN, Hairiah K, Ismunandar S, Sitompul SM and Van Noordwijk M, 1992. Can low external masukan cropping systems on acid upland soils in the humid tropics be sustainable?: Backgrounds of the UNIBRAW/IB Nitrogen management project in Bunga Mayang (Sungkai Selatan, Kota Bumi, N. Lampung, S. Sumatra, Indonesia. *Agrivita* 15, No 1, 1-9.

Buku pedoman

Khan AAH and Ong CK, 1994. Design and calibration of tipping bucket system for field run-off and sediment quantification. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF). Naerobi, Kenya.

Van Noordwijk M and Lusiana B, 1999. WaNuLCAS 2.0.: Background on a model of Water, Nutrient and Light, Capture in Agroforestry Systems. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF). Bogor.

Disertasi

De Willigen P and Van Noordwijk M, 1987. Roots for plant production and nutrient use efficiency, Doctoral thesis Agricultural University Wageningen, 282 pp.

Suprayogo D, 2000. Testing the safety-net hypothesis in hedgerow intercropping: water balance and mineral-N leaching in the humid tropics. PhD. Thesis. Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London.