



KONSERVASI TANAH MENGHADAPI PERUBAHAN IKLIM



**IAARD
PRESS**

**BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN PERTANIAN
KEMENTERIAN PERTANIAN**

Konservasi Tanah Menghadapi Perubahan Iklim

Penyunting

Fahmuddin Agus

D. Subardja

Yoyo Soelaeman



**BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN PERTANIAN
KEMENTERIAN PERTANIAN**

2014



Cetakan I 2014

Hak cipta dilindungi undang-undang

©Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, 2014

Hak Cipta pada Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, 2014

Katalog dalam terbitan

BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN PERTANIAN

Konservasi Tanah Menghadapi Perubahan Iklim /Penyunting, Fahmuddin

Agus... [et al.].-- Jakarta: IAARD Press, 2014

xv, 268 hlm.: ill.; 25 cm

631.459

1. Konservasi Tanah 2. Perubahan Iklim.

I. Judul II. Agus, Fahmuddin

ISBN 978-602-1520-90-1

Penanggung Jawab : Kepala Balai Penelitian Tanah

Penyusun : Fahmudin Agus, Yoyo Soelaeman, Irawan, Neneng L. Nurida, Ai Dariah, Umi Haryati, Maswar, Ishak Juarsah, Sidik Hadi Tala'ohu, Deddy Erfandi, Jubaedah, Rahmah Dewi Yustika, dan Sutono

Redaksi Pelaksana : Joko Purnomo, Sri Erita Aprillani, dan Yayan Supriana

Tata letak : Yayan Supriana, Didi Supardi, dan Nadina A. Indrawan

IAARD PRESS

Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian

Jalan Ragunan No. 29, Pasar Minggu, Jakarta 12540

Telp.: +62 21 7806202, Faks.: +62 21 7800644

Alamat Redaksi:

Pusat Perpustakaan dan Penyebaran Teknologi Pertanian

Jalan Ir. H. Juanda No. 20, Bogor 16122

Telp.: +62 251 8321746, Faks.: +62 251 8326561

e-mail: iaardpress@litbang.pertanian.go.id

Anggota IKAPI No. 442/DKI/2012

Konservasi Tanah Menghadapi Perubahan Iklim

Penasehat

Dr. Ir. Haryono, M.Sc

Kepala Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian

Pengarah

Dr. Ir. Dedy Nursyamsi, M.Agr

Kepala Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian

Penanggung Jawab

Dr. Ir. Ali Jamil, MP

Kepala Balai Penelitian Tanah

Penyusun

Fahmudin Agus	Ishak Juarsah
Yoyo Soelaeman	Sidik Hadi Tala'ohu
Irawan	Deddy Erlandi
Neneng L. Nurida	Jubaedah
Ai Dariah	Rahmah Dewi Yustika
Umi Haryati	Sutono
Maswar	

Penyunting

Fahmuddin Agus

D. Subardja

Yoyo Soelaeman

Redaksi Pelaksana

Joko Purnomo

Sri Erita Aprillani

Yayan Supriana

Diterbitkan oleh

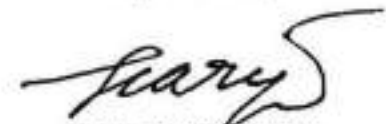
BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN PERTANIAN
KEMENTERIAN PERTANIAN
2014

Pertambahan penduduk dan peningkatan konsumsi menyebabkan peningkatan tekanan terhadap sumber daya lahan. Selain itu eratny keterkaitan antara penggunaan dan pengelolaan lahan dengan perubahan iklim menyebabkan penerapan teknologi konservasi tanah harus diintensifkan dan harus dikaitkan dengan adaptasi dan mitigasi terhadap perubahan iklim. Buku dengan judul *Konservasi Tanah Menghadapi Perubahan Iklim* diterbitkan untuk menjawab berbagai tantangan terhadap konservasi tanah dan keterkaitan antara konservasi tanah dengan perubahan iklim.

Lima bab pertama dari buku ini membahas keterkaitan konservasi tanah dengan mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim. Tiga bab berikutnya khusus membahas tentang konservasi dan rehabilitasi tanah bermasalah khusus, termasuk diantaranya masalah salinitas, pencemaran oleh logam berat, dan kerusakan pada lahan bekas tambang. Satu bab membahas tentang pengelolaan air yang juga sangat terkait dengan adaptasi dan mitigasi perubahan iklim. Sebagai bab penutup adalah valuasi ekonomi penerapan konservasi tanah dan air. Dengan cakupan seperti ini diharapkan buku ini tampil sesuai dengan kebutuhan zamannya.

Buku ini ditujukan untuk pembaca di kalangan peneliti, akademisi, dan praktisi di bidang konservasi tanah dan air. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian mengucapkan terima kasih kepada penulis, editor, dan redaksi pelaksana. Semoga buku ini bermanfaat bagi para pembaca sekalian.

Kepala Badan,



Dr. Ir. Haryono, M.Sc

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	iii
1. PERAN KONSERVASI TANAH DALAM BERADAPTASI TERHADAP PERUBAHAN IKLIM (Rahmah Dewi Yustika dan Fahmuddin Agus).....	1
2. DINAMIKA CADANGAN KARBON TANAH AKIBAT PERUBAHAN DAN INTENSITAS PENGGUNAAN LAHAN (Ai Dariah dan Maswar)	31
3. TEKNOLOGI PENINGKATAN CADANGAN KARBON LAHAN KERING DAN POTENSINYA PADA SKALA NASIONAL (Neneng L. Nurida dan Jubaedah).....	53
4. TEKNOLOGI PENGELOLAAN LAHAN GAMBUT DAN SUMBANGANNYA TERHADAP MITIGASI GAS RUMAH KACA (Maswar dan Ai Dariah)	83
5. SISTEM PERTANIAN NIR LIMBAH DAN EFISIEN KARBON (Umi Haryati dan Sutono)	105
6. REKLAMASI LAHAN UNTUK MENGATASI MASALAH SALINITAS TANAH (Deddy Erfandi dan Ishak Juarsah).....	135
7. TEKNOLOGI PENGENDALIAN PENCEMARAN LOGAM BERAT PADA LAHAN PERTANIAN (Deddy Erfandi dan Ishak Juarsah)	159
8. REKLAMASI LAHAN PASCA PENAMBANGAN BATUBARA (Sidik Haddy Tala'ohu dan Irawan)	187
9. EFISIENSI PENGGUNAAN AIR PADA PERTANIAN LAHAN KERING DALAM UPAYA ADAPTASI TERHADAP PERUBAHAN IKLIM (Sutono dan Umi Haryati)	215
10. VALUASI EKONOMI APLIKASI TEKNIK KONSERVASI TANAH (Irawan dan Neneng L. Nurida).....	241
11. KESIMPULAN UMUM (Fahmuddin Agus dan Achmad Rachman).....	263

1. PERAN KONSERVASI TANAH DALAM BERADAPTASI TERHADAP PERUBAHAN IKLIM

Rahmah Dewi Yustika dan Fahmuddin Agus

Peneliti Balitbangtan di Balai Penelitian Tanah

Pendahuluan

Peningkatan emisi gas rumah kaca (GRK), terutama karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan dinitrogen oksida (NO_2) berhubungan sangat erat dengan perubahan iklim. Emisi GRK tersebut berasal dari kegiatan industri, transportasi, rumah tangga, pertanian dan limbah yang semakin meningkat ketergantungannya dengan penggunaan bahan bakar fosil yang tidak terbarukan. Dari sektor pertanian, kegiatan perluasan (ekstensifikasi) lahan pertanian terutama bila menggunakan lahan hutan, penggunaan lahan gambut untuk pertanian, persawahan, pemberian pupuk, dan praktek pembakaran merupakan kontributor emisi GRK.

Perubahan iklim mempunyai dampak terhadap peningkatan suhu udara dan tinggi muka air laut, intrusi air laut yang meningkatkan salinitas lahan pertanian, perubahan pola hujan, peningkatan kejadian ekstrim El Niño dan La Niña, sehingga mempengaruhi produksi pertanian. Pertanian sebagai salah satu sumber daya yang menunjang perekonomian suatu negara merupakan sektor yang rentan terhadap perubahan iklim. Perubahan iklim mempunyai pengaruh terhadap ketahanan pangan, produktivitas tanah dan tanaman, kesehatan tanaman, hama penyakit tanaman, ketersediaan air, dan ekosistem lingkungan. Kejadian iklim ekstrim seperti yaitu El-Niño dan La-Niña dapat menyebabkan (a) kegagalan panen; (b) kerusakan sumber daya lahan pertanian; (c) peningkatan intensitas banjir dan kekeringan; dan (d) peningkatan intensitas gangguan organisme pengganggu tanaman (Las *et al.* 2008).

Permasalahan ketahanan pangan di negara berkembang lebih kompleks dibandingkan negara maju karena kurangnya sarana dan prasarana pertanian serta kebijakan yang kurang berpihak pada sektor pertanian. Krisis pangan yang dikuasai oleh perubahan iklim dapat disebabkan karena gagal panen akibat pola hujan yang tidak menentu sehingga tanaman tidak mendapatkan air pada waktu dan jumlah yang sesuai dengan kebutuhan tanaman.

Peningkatan suhu juga dapat berdampak terhadap peningkatan intensitas organisme pengganggu tanaman karena peningkatan suhu mempunyai pengaruh terhadap siklus hidup hama dan penyakit tanaman yang disebabkan oleh virus, bakteri, jamur, dan berbagai macam parasit.

Perubahan pola curah hujan dapat menimbulkan beberapa dampak yang merugikan. Peningkatan curah hujan pada tahun 2010 mengakibatkan penurunan produksi jambu mete karena terganggunya pembungaan di Ngadirojo, Sidoharjo, Selogiri, dan Muna dibandingkan pada tahun 2009 (Supriyadi dan Heryana 2011). Selain itu peningkatan curah hujan pada tahun 2010 menyebabkan produksi cabai rawit di Desa Bulupasar, Kabupaten Kediri menurun dibandingkan dengan pada tahun 2009 (Maulidah *et al.* 2012). Peningkatan frekuensi kejadian hujan dapat meningkatkan serangan hama *Citripestis sagittiferella* (Muryati 2007). Hal ini kelihatannya berhubungan dengan peningkatan kelembapan tanah yang tinggi yang merangsang pembentukan pupa *Citripestis sagittiferella* untuk keluar dari dalam tanah menjadi ngengat. Hama tanaman kentang *Liriomyza huidobrensis* memiliki intensitas serangan yang lebih tinggi pada musim kemarau (Setiawati *et al.* 2002). Populasi hama tersebut dipengaruhi oleh suhu, kelembapan, dan angin.

Meningkatnya suhu dan kelembapan tanah dapat mempercepat dekomposisi residu tanaman karena aktivitas mikroba yang juga meningkat. Namun peningkatan suhu udara juga dapat mempercepat pertumbuhan dan kematangan tanaman. Di sisi lain tanaman juga dapat mengalami stress karena suhu meningkat secara ekstrim sehingga metabolismenya terganggu.

Kelembapan tanah yang terlalu tinggi atau terlalu rendah akan mengganggu pertumbuhan akar dan ketersediaan hara. Berbagai perlakuan konservasi tanah dapat mengurangi kecepatan mengeringnya tanah dan meningkatkan infiltrasi sehingga menurunkan risiko genangan.

Disebabkan kompleks dan rumitnya pengaruh perubahan iklim terhadap pertanian, maka Sektor Pertanian perlu meningkatkan ketangguhannya (*resilience*) terhadap perubahan iklim. Bab ini khusus membahas pengaruh perubahan iklim terhadap tanah dan pengaruh teknologi konservasi tanah dalam meningkatkan daya adaptasi terhadap perubahan iklim.

Dampak Perubahan Iklim Terhadap Tanah

Perubahan iklim mempunyai pengaruh terhadap degradasi tanah, air, dan pertumbuhan serta produksi tanaman. Degradasi tanah dapat dipicu oleh berbagai faktor kemunduran sifat fisik, kimia, dan proses biologi tanah. Kemunduran sifat fisik tanah disebabkan karena erosi, pemadatan, dan rekahan. Kemunduran sifat kimia tanah disebabkan pencucian hara, pengasaman, dan salinisasi, sedangkan kemunduran sifat biologi tanah karena berkurangnya bahan organik tanah dan biodiversitas biota tanah.

Percepatan Erosi dan Aliran Permukaan

Erosi tanah merupakan pengangkutan bahan-bahan material tanah yang disebabkan oleh pergerakan air maupun angin. Perubahan iklim yang meningkatkan curah hujan yang turun dapat menyebabkan erosi. Erosi dapat mengakibatkan merosotnya produktivitas dan daya dukung tanah untuk produksi pertanian dan lingkungan hidup, karena pada prosesnya terjadi pengangkutan tanah lapisan atas yang kaya hara. Erosi yang berjalan intensif pada permukaan tanah dapat menyebabkan terangkutnya kompleks liat dan humus serta partikel tanah lainnya yang kaya akan unsur hara yang diperlukan oleh tanaman. Erosi ini merupakan masalah yang serius sebab tidak hanya menurunkan kualitas fisik dan kimia tanah, tetapi juga menurunkan kualitas air.

Perubahan pola hujan yang mengakibatkan intensitas hujan meningkat dapat menimbulkan peningkatan aliran permukaan dan erosi (Nearing *et al.* 2004). Aliran permukaan berasal dari kelebihan infiltrasi (*infiltration excess overland flow*) yang terjadi bila intensitas hujan melebihi laju infiltrasi. Faktor-faktor yang mempengaruhi sifat aliran permukaan antara lain: (a) curah hujan: jumlah, intensitas dan distribusi; (b) temperatur; (c) tanah: tipe, jenis substratum dan topografi (tanah berpasir akan mempunyai laju aliran permukaan yang lebih rendah dibandingkan dengan tanah berliat); (d) luas daerah aliran dan panjang lereng (laju aliran permukaan akan lebih tinggi dengan semakin panjangnya lereng); (e) keberadaan, tinggi dan bentuk kanopi serta kerapatan tanaman/tumbuhan penutup tanah; dan (f) sistem pengelolaan tanah (Arsyad 2010; Agus dan Widiyanto 2004).

Erosi bisa terjadi sangat lambat, atau dapat juga sangat cepat, tergantung pada bentang alam, kemiringan lahan, sifat kepekaan tanah dan keadaan hujannya. Proses erosi dapat terjadi secara alamiah atau dipercepat (*accelerated*) akibat aktivitas manusia yang dapat memindahkan sebagian tanah yang ada di bentang alam.

Kejadian erosi dapat mengakibatkan kehilangan hara yang dibutuhkan tanaman untuk tumbuh dan berkembang secara optimal. Sudirman *et al.* (1986) menyatakan bahwa hilangnya lapisan atas tanah dapat menyebabkan penurunan kadar bahan organik, peningkatan pemadatan tanah, penurunan stabilitas agregat tanah, peningkatan kejenuhan aluminium serta penurunan KTK tanah. Kejadian erosi yang semakin sering dapat menurunkan kadar bahan organik dan unsur hara dalam tanah. Hal ini dapat menurunkan kualitas tanah yang pada akhirnya menurunkan produktivitas tanah.

Dinamika Karbon Organik Tanah

Pada proses erosi, terjadi proses translokasi karbon organik tanah yang terdeposisi dan selanjutnya ke badan air. Sebagian lainnya terdeposisi dan terdistribusi ke tempat lain, dan sebagiannya ada yang mengalami emisi ke atmosfer. Pengurangan karbon organik tanah dapat mengakibatkan penurunan kualitas tanah, mengurangi aktivitas mikroba, berdampak terhadap pori air tersedia untuk tanaman dan juga terhadap produktivitas tanaman. Ketersediaan karbon organik tanah dipengaruhi oleh vegetasi (Tabel 1), tekstur tanah, iklim, tingkat dekomposisi, pengolahan tanah, dan karakteristik profil tanah.

Tabel 1. Biomass di atas permukaan tanah, C stok di atas permukaan tanah, dan karbon stok tanah di hutan dan padang alang-alang

Lokasi	Biomass di atas permukaan tanah (t/ha)	C stok di atas permukaan tanah (t/ha) A	Karbon stok tanah (t/ha)	Total karbon stok (t/ha) B	Rasio A/B
Sumatra					
Hutan primer	-	219,6	84,4	305	0,72
Hutan sekunder	-	123,6	85,4	219	0,61
Padang alang-alang	-	2,4	44,6	47	0,05
Kalimantan Timur					
Bukit Soeharto	309,3	154,7	13,19	187,9	0,82
Hutan sekunder, 33 tahun setelah bera	97,4	43,83	38,98	82,81	0,53
Hutan sekunder, 10-12 tahun setelah kebakaran	50,5	22,72	38,98	61,7	0,40
Padang alang-alang	7,5	3,45	36,19	39,64	0,09

Sumber: Van der Kamp *et al.* (2009)

Penurunan Biodiversitas Organisme Tanah

Interaksi berbagai mikroorganisme, mikroflora, dan fauna tanah berperan dalam proses fisika, kimia, dan biologi tanah untuk menunjang kesuburan tanah. Organisme tanah berperan dalam menghancurkan bahan-bahan sisa tanaman dan menjadi ukuran yang lebih kecil dan dapat dimanfaatkan oleh mikroba tanah, sehingga menjadi rantai bahan organik yang lebih sederhana dan akhirnya terurai menjadi bentuk ion yang tersedia untuk pertumbuhan tanaman.

Dekomposisi bahan organik, selain untuk penyediaan unsur hara, berperan dalam proses dekomposisi, membuat aerasi tanah menjadi lebih baik, mencampurkan hara dari lapisan atas ke lapisan bawah dan sebaliknya, menggemburkan tanah, merubah sisa-sisa tanaman menjadi humus, dan berperan dalam agregasi tanah antara bahan organik dan bahan mineral tanah.

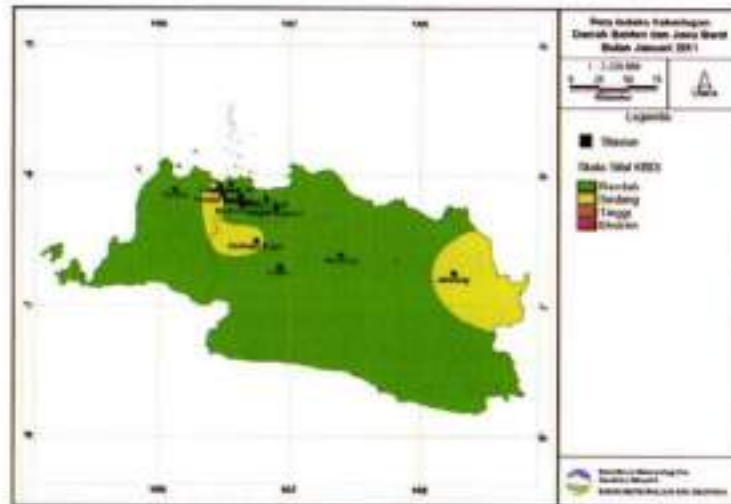
Perubahan iklim dapat berpengaruh terhadap biodiversitas organisme yang terdapat di dalam tanah. Organisme tanah memerlukan kondisi suhu tertentu untuk aktivitasnya dan keadaan ekstrim kering, ekstrim basah dan peningkatan suhu tanah akan mempengaruhi keanekaragaman organisme tanah.

Kekeringan

Musim kemarau yang semakin panjang akibat perubahan pola hujan dapat mengakibatkan terganggunya musim tanam. Fase-fase perkembangan tanaman yang membutuhkan air bisa mengalami gangguan yang mengakibatkan terganggunya metabolisme tanaman dan akhirnya produktivitas tanaman menjadi menurun. Cekaman karena kekurangan air pada akhirnya dapat menyebabkan tanaman mati.

Beberapa metode analisis dapat memberikan informasi mengenai kekeringan yang dapat melanda di suatu daerah. Batas kritis curah hujan di Jawa Barat yang dapat memicu kejadian kekeringan berdasarkan pendekatan median di lokasi sawah yang relatif dekat dengan pantai rata-rata adalah 64 mm/bulan dengan peluang rata-rata 0,73 (Estiningtyas *et al.* 2009). Dilaporkan juga bahwa lokasi sawah yang dekat dengan pantai mempunyai frekuensi kejadian curah hujan kritis yang menyebabkan kekeringan yang lebih besar dibandingkan daerah lainnya.

BMKG telah mengeluarkan peta indeks kekeringan untuk mengetahui skala kekeringan yang terjadi di daerah Banten dan Jawa Barat pada bulan Januari 2011 (Gambar 1). Melalui peta indeks kekeringan tersebut *stakeholder* yang terkait diharapkan bisa mengantisipasi dampak kekeringan melalui pemilihan pola tanam yang sesuai dan pemilihan varietas tanaman yang cocok dengan iklim yang terjadi.



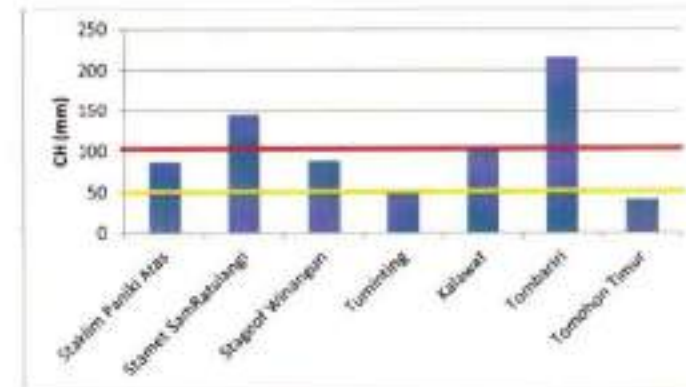
Gambar 1. Peta Indeks Kekeringan Daerah Banten dan Jawa Barat Bulan Januari 2011 (<http://www.bmkg.go.id/ImagesData/ImagesDataBW2/Indekskeringan.jpg>)

Kelebihan Air

Banjir merupakan salah satu dampak yang muncul akibat perubahan iklim. Pola hujan yang berubah dengan kejadian curah hujan ekstrem dapat menimbulkan kerugian tidak hanya pada sektor perumahan, perkantoran, transportasi, akan tetapi memiliki imbas terhadap sektor pertanian. Pola hujan yang berubah dapat mengakibatkan tanaman mengalami gagal panen karena tanaman menjadi busuk ataupun rusak akibat banjir. Selain itu, potensi terjadinya serangan hama dan penyakit juga lebih besar sehingga kerugian yang tidak sedikit harus ditanggung petani. Lahan pertanian yang tidak adaptif terhadap curah hujan ekstrem dapat terkonversi menjadi lahan non pertanian.

Banjir besar terjadi bila curah hujan tinggi jatuh pada tanah jenuh air sehingga tanah tidak mampu lagi menyerap air. Meningkatnya iklim ekstrem mempunyai pengaruh terhadap bencana alam. Batas kritis curah hujan yang dapat memicu kejadian banjir berdasarkan pendekatan median di lokasi sawah yang relatif dekat dengan pantai rata-rata adalah 140 mm/bulan dengan peluang rata-rata 0,6 (Estiningtyas *et al.* 2009).

Curah hujan yang tinggi menyebabkan bencana banjir dan tanah longsor seperti di Sulawesi Utara tanggal 15 Januari 2014. Gambar 2 menunjukkan bahwa pada beberapa tempat terdapat curah hujan ekstrem (>100 mm/hari) sehingga hujan turun hampir setiap hari dengan intensitas sedang hingga sangat lebat yang mengakibatkan banjir di Sulawesi Utara (BMKG, 2014).



Gambar 2. Distribusi curah hujan (CH) pada tanggal 14/15 Januari 2014 di Sulawesi Utara (Sumber: BMKG 2014)

Pulau Jawa, khususnya Jakarta merupakan daerah yang rawan banjir. Banjir tersebut dipicu oleh konversi perutupan lahan dari hutan menjadi penggunaan lain di daerah hulu yang tidak mengakomodir masuknya air ke dalam lapisan tanah. Air yang jatuh dengan cepat menjadi aliran permukaan yang kemudian terkonsentrasi menuju sungai. Daerah hilir yang mengalami kerusakan DAS dalam bentuk konversi dari wilayah serapan air menjadi perumahan, jalan, dan bangunan lainnya tidak dapat menampung air dari daerah hulu sehingga terjadi banjir. Banjir tersebut diperparah dengan adanya perubahan pola hujan dengan intensitas curah hujan yang tinggi sehingga debit air sungai melebihi kapasitas tampung sungai yang ada.

Adaptasi Pertanian Terhadap Perubahan Iklim Melalui Konservasi Tanah

Adaptasi dilakukan untuk mengurangi dampak negatif dari perubahan iklim. Pertanian merupakan salah satu sektor yang sangat rentan terhadap pengaruh

perubahan iklim, sehingga memerlukan suatu adaptasi sebagai suatu respon agar dapat meminimalisir dampak perubahan iklim terhadap pertanian. Adaptasi tersebut mempunyai pengaruh terhadap berubahnya manajemen lahan dan pola tanam yang biasa diterapkan.

Petani telah terbiasa melakukan usaha tani dengan melakukan pengolahan tanah secara intensif dengan menggunakan traktor ataupun cangkul tanpa memperhatikan kerusakan struktur tanah yang terjadi. Residu tanaman setelah panen juga diangkut keluar lahan tanpa ada usaha untuk memberikan bahan organik sebagai gantinya. Kondisi tersebut apabila terjadi dalam jangka waktu lama dan terus-menerus dapat mengakibatkan produktivitas tanah menurun dan secara langsung berakibat pada merosotnya produktivitas tanaman. Petani harus dapat beradaptasi terhadap lingkungan iklim yang baru agar nilai produktivitas pertanian tidak menurun drastis dengan melakukan konservasi tanah dan konservasi karbon. Pertanian konvensional harus diubah menjadi sistem pertanian yang menerapkan teknologi inovasi supaya tidak saja bertahan, tetapi harus senantiasa meningkat produksinya (Tabel 2).

Tabel 2. Perbedaan praktek pertanian konvensional dan pertanian yang inovatif

Praktek Konvensional	Praktek Pertanian yang direkomendasikan
1. Membajak tanah	1. Pengolahan konservasi, olah tanah minimum atau tanpa olah tanah (<i>no till</i>)
2. Pembuangan residu tanaman atau pembakaran	2. Residu dikembalikan sebagai mulsa atau kompos
3. Bera	3. Penanaman penutup tanah dan intensifikasi
4. Input pertanian rendah	4. Penggunaan pupuk dan bahan organik untuk meningkatkan dan menyeimbangkan ketersediaan hara sesuai kebutuhan tanaman.
5. Penggunaan pupuk secara reguler	5. Spesifik manajemen dan <i>precision farming</i>
6. Tidak ada kontrol air	6. Konservasi air, panen daur ulang air, irigasi tetes, <i>sub-surface</i> irigasi, manajemen muka air tanah
7. <i>Alley cropping</i>	7. Konservasi vegetatif dengan memanfaatkan vegetasi natural (tidak selalu harus ditanam)
8. Monokultur	8. Penanaman berbagai tanaman (<i>multiple cropping system</i>)
9. Pengelolaan lahan dipengaruhi demarkasi administratif	9. Manajemen skala daerah aliran sungai (DAS)
10. Drainase lahan gambut	10. Merehabilitasi lahan gambut terdegradasi

Sumber: Dimodifikasi dari Lal (2000)

Teknologi konservasi tanah dan air yang adaptif terhadap perubahan iklim sangat diperlukan agar keberlangsungan sektor pertanian dapat *sustainable*. Teknik konservasi tanah merupakan suatu penggunaan tanah sesuai dengan kemampuannya dan sesuai dengan syarat-syarat yang diperlukan agar tidak terjadi degradasi tanah. Pada wilayah yang mengalami curah hujan ekstrim, teknik konservasi tanah berfungsi untuk menjaga agar tanah dapat terlindungi dari kejadian erosi dan aliran permukaan yang mengangkut partikel-partikel tanah dan unsur hara dari lapisan atas tanah, sedangkan pada wilayah dengan curah hujan lebih kecil (musim kemarau lebih panjang), aplikasi teknologi konservasi tanah dapat menjaga kelembapan tanah/ kandungan air tanah. Teknik konservasi tanah mekanik merupakan perlakuan fisik mekanis yang diberikan terhadap tanah yang sering disebut dengan teknik konservasi sipil teknis. Teknik konservasi tanah vegetatif merupakan tindakan konservasi yang menggunakan tumbuh-tumbuhan (vegetasi), baik tanaman legum yang menjalar, semak atau perdu, maupun pohon, rumput-rumputan serta tumbuh-tumbuhan lain.

Beberapa teknik adaptasi pertanian untuk mengantisipasi perubahan iklim melalui teknologi konservasi tanah dan air adalah sebagai berikut:

Pengolahan Tanah Konservasi

Dalam menyiapkan lahan sebelum dilakukan penanaman, petani pada umumnya melakukan pengolahan tanah pada kedalaman tertentu. Pemakaian *hand tractor* atau jenis traktor lainnya digunakan untuk menggemburkan tanah dan menciptakan kondisi yang sesuai untuk pertumbuhan tanaman. Selain itu pengolahan tanah juga ditujukan untuk membunuh gulma tanaman yang tidak diinginkan. Selain menggunakan traktor, petani juga melakukan pengolahan tanah berikutnya menggunakan garu yang bertujuan untuk meratakan permukaan tanah.

Pengolahan tanah pada lahan pertanian dapat meningkatkan emisi gas rumah kaca. Pengolahan tanah mengakibatkan oksidasi bahan organik berjalan dengan cepat, sehingga meningkatkan pelepasan gas karbondioksida ke *atmosphere*. Pengolahan tanah yang dilakukan secara berlebihan dapat membuat bahan organik terdegradasi secara cepat sehingga mengakibatkan gas (CO_2) dapat teremis relatif cepat. Tanah yang mempunyai bahan organik sedikit dapat mempengaruhi produktivitas tanah.

Pengolahan tanah terkait dengan struktur tanah, kehidupan biota tanah, karbon dan nitrogen di dalam tanah. Tanah merupakan sumber gas rumah kaca dan sebagai sink (cadangan) gas rumah kaca tergantung kepada manajemen

yang diterapkan. Emisi ataupun sekuestrasi dari gas rumah kaca sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat tanah seperti kelembapan, temperatur, jumlah karbon organik, pH dan kapasitas tukar kation. Pengolahan tanah merupakan manajemen yang dapat mempengaruhi parameter sifat fisik tanah tersebut (Ugalde *et al.* 2007).

Pengolahan konvensional dapat merusak struktur tanah dan memperburuk kondisi agregat tanah. Kerugian yang ditimbulkan dari pengolahan tanah konvensional adalah timbulnya erosi akibat tanah yang agregatnya lemah (*fragile*), sehingga mudah pecah karena tetesan air hujan dan terangkut bersama air aliran permukaan. Pengolahan tanah secara intensif dapat merusak struktur dan stabilitas agregat tanah. Erosi dapat merugikan karena menghanyutkan hara yang bermanfaat bagi tanaman untuk tumbuh dan berkembang.

Manajemen pengolahan tanah konservasi merupakan suatu cara untuk beradaptasi terhadap perubahan iklim karena dapat meminimalisir penguapan air akibat keberadaan sisa tanaman di permukaan tanah, meningkatkan bahan organik dan karbon tanah, meningkatkan kualitas lingkungan, sehingga meningkatkan daya adaptasi tanaman terhadap perubahan iklim. Pengolahan tanah minimum dan pengolahan tanah konservasi merupakan sistem operasi pengolahan tanah yang dapat mengurangi erosi tanah dan aliran permukaan (Zhang and Nearing 2005). Pengurangan intensitas pengolahan tanah dapat meningkatkan karbon organik tanah melalui pengurangan dekomposisi bahan organik tanah oleh mikroba tanah. Aplikasi pengolahan tanah konservasi dapat lebih mendukung struktur dan agregasi tanah serta bahan organik tidak terdegradasi dengan cepat.

Bhatt and Khara (2006) menyatakan bahwa aliran permukaan dan erosi (*soil loss*) pada pengolahan tanah minimum lebih kecil dibandingkan dengan pengolahan konvensional. Sejalan hal tersebut hasil penelitian Suwardjo (1981) menunjukkan bahwa pada lahan yang diolah tanpa aplikasi mulsa mempunyai laju erosi yang lebih besar dibandingkan dengan lahan yang tidak diolah dan ditambahkan mulsa (Tabel 3). Perlakuan tanah yang tidak diolah dalam keadaan terbuka dapat menyebabkan erosi yang lebih besar dibandingkan dengan tanah yang diolah dan ditambahkan mulsa. Pengolahan tanah konservasi dapat memperbaiki agregasi tanah dan struktur tanah serta meningkatkan infiltrasi. Pengolahan tanah yang terlalu intensif dapat berdampak pada pecahnya agregat menjadi partikel-partikel yang lebih kecil, sehingga mudah mengalami dispersi dan tererosi. Perlakuan pengolahan tanah sebaiknya menerapkan praktek konservasi dengan menerapkan mulsa agar lahan tidak cepat mengalami degradasi.

Tabel 3. Pengaruh pengolahan tanah dan penggunaan mulsa terhadap erosi dan aliran permukaan pada tanah Oxisol Citayam, Bogor, Jawa Barat.

Perlakuan	Erosi (t/ha/musim tanam)	Aliran permukaan (m ³ /ha/musim tanam)
Tanah terbuka tidak diolah	165,2a	1860,0a
Diolah, ditanami, tanpa mulsa	112,4b	1593,5a
Tidak diolah, mulsa jerami	4,3c	622,0b
Tidak diolah, mulsa batang kacang tanah (6 t/ha)	8,9d	230,5b
Tidak diolah, mulsa batang kacang tanah seluruhnya	6,6c	404,4c

Sumber: Suwardjo 1981

Agroforestri

Agroforestri merupakan sistem pemanfaatan lahan yang memiliki unsur-unsur: 1) penggunaan lahan oleh manusia; 2) penerapan teknologi; 3) memiliki komponen tanaman semusim, tanaman tahunan dan/atau ternak; 4) waktu dapat bersamaan atau bergiliran dalam suatu periode tertentu; dan 5) terdapat interaksi ekologi, sosial, dan ekonomi (Hairiah *et al.* 2003). Salah satu bentuk agroforestri yaitu kegiatan yang menanam pohon-pohon kayu di sela-sela tanaman pertanian. Penanaman tanaman tahunan bermanfaat dalam menghambat energi kinetik air hujan dan meningkatkan intensitas penutupan permukaan tanah sehingga laju erosi dapat dihambat. Penerapan agroforestri dapat berperan dalam menyimpan cadangan air dan dapat menghambat aliran permukaan. Selain itu penanaman agroforestri dapat meningkatkan cadangan karbon pada biomas tanaman, meskipun cadangan karbon tidak sebesar yang terdapat di hutan. Penanaman tanaman semusim diselingi dengan tanaman pohon (agroforestri) yang mengkombinasikan antara tanaman pohon dengan tanaman semusim dapat bermanfaat bagi keberlanjutan sumber daya air-tanah dan penyerapan karbon (Lal 2004).

Kopi merupakan tanaman yang membutuhkan naungan sehingga terdapat agroforestri kopi dari tingkat sederhana sampai multistrata. Agroforestri kopi berperan dalam cadangan karbon (Tabel 4). Terdapat perbedaan cadangan karbon pada agroforestri multistrata dengan agroforestri sederhana karena

dipengaruhi oleh umur tanaman, cara pengelolaan, kerapatan tanaman dan pohon naungan. Agroforestri multistrata mempunyai cadangan karbon yang lebih besar dibandingkan dengan agroforestri sederhana.

Tabel 4. Peningkatan cadangan karbon tahunan dan *time-averaged* cadangan karbon (C) berbagai tipe kebun kopi di Indonesia

Tipe kebun kopi	Peningkatan cadangan C per tahun	Time-avg C stock ¹⁾	Rata-rata time-avg C stock	Rata-rata time-avg cadangan C per tipe kebun kopi
		Mg/ha		
Agroforestri multistrata	0,9 – 1,86	23 – 47	35	41
Agroforestri sederhana ²⁾	0,6 – 0,97	15 – 24	19,5	
Agroforestri sederhana ³⁾	2,8	70	70	
Monokultur	0,5	12,5	12,5	12,5

Keterangan: ¹⁾= umur rata-rata kopi di lapangan 25 tahun; ²⁾= kondisi kebun milik masyarakat; ³⁾= kondisi kebun percobaan

Sumber: Hairiah dan Rahayu (2010)

Keberadaan perakaran dari tanaman pohon dapat memperbaiki sifat tanah yaitu menciptakan agregasi yang lebih baik sehingga dapat mendukung pertumbuhan tanaman dan meningkatkan daya cengkram terhadap tanah, sehingga tahan terhadap percikan air hujan dan tidak mudah longsor. Pada lereng yang curam, aplikasi agroforestri dengan tanaman pertanian lainnya (pangan/sayuran) dapat menghambat laju erosi dibandingkan dengan hanya tanaman semusim. Terdapat proporsi tanaman tahunan dan tanaman semusim yang berbeda-beda pada berbagai tingkat keterlereng. Pada keterlereng <15%, 15%-30%, 30%-45% proporsi tanaman tahunan: berbanding tanaman semusim yaitu 25%:75%, 50%:50%, dan 75%:25% (P3HTA 1983). Keberadaan perakaran juga dapat mendukung ekosistem yang hidup di sekitar perakaran dan menciptakan habitat bagi organisme tanah.

Aplikasi sistem agroforestri dapat membentuk teras alami setelah beberapa tahun tergantung kepada kondisi lahan. Tanaman pagar serongan jantan (*Plemingia congesta*) pada sistem pertanaman lorong (*alley cropping*) di tanah Ultisol, Jasinga dapat menahan material yang dibawa aliran permukaan, sehingga dapat membentuk teras alami setelah 4 tahun dan dapat menghasilkan bahan hijauan sebagai mulsa penutup tanah pada tahun ketiga (Sutono *et al* 1998).

Teras Bangku

Teras bangku merupakan teknik konservasi yang memotong lereng sehingga panjang dan kecuraman lereng dapat berkurang. Terdapat 3 jenis teras bangku yaitu gulir kampak, datar, dan miring. Teras bangku berfungsi menghambat aliran permukaan dan dapat meningkatkan infiltrasi air ke dalam tanah sehingga berfungsi menyimpan cadangan air tanah (Gambar 3). Tindakan mencegah aliran permukaan merupakan suatu langkah yang dapat menjaga dan melestarikan lahan pertanian dan meningkatkan kualitas lingkungan.

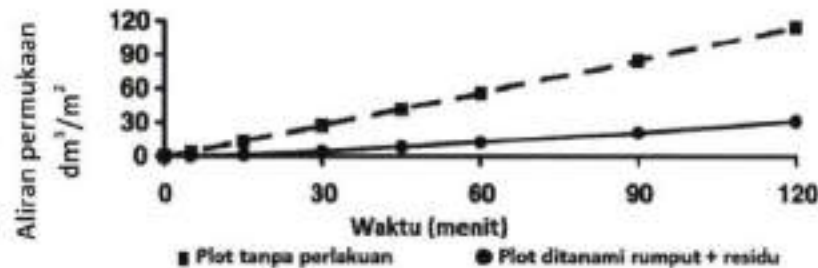


Gambar 3. Teras bangku dengan rumput pelindung tampingan teras (Foto: Multifungsi Pertanian)

Penelitian mengenai keefektifan teras bangku dalam menghambat aliran permukaan sudah banyak dilakukan. Menurut Haryati *et al* (1995) pada tahun pertama penelitian di Ungaran, aliran permukaan pada teras bangku datar adalah yang paling rendah, disusul kemudian oleh teras gulud, teras kredit dan teras bangku miring. Setelah tahun ketiga penelitian, aliran permukaan yang terjadi pada semua teknologi konservasi teras yang dicobakan sudah cukup rendah.

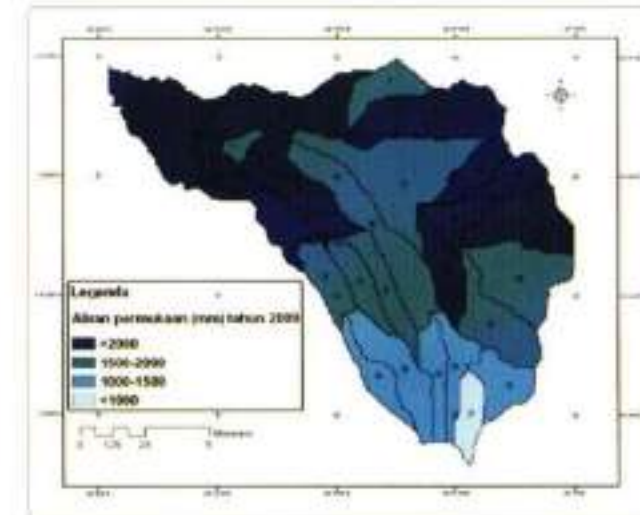
Aplikasi kombinasi teras bangku dengan penanaman rumput memperlihatkan keefektifan mengendalikan erosi tanah yang lebih besar dibandingkan dengan hanya aplikasi teras bangku. Penelitian yang dilakukan Sang Arun *et al* (2006) menunjukkan bahwa teras yang ditanami dengan

rumpun dan residu tanaman dapat efektif menghambat aliran permukaan dibandingkan dengan teras yang tidak ditanami rumput (*bare terrace*) dan diberikan residu. Kumulatif aliran permukaan dari teras yang tidak ditanami rumput dan tidak diberikan residu tanaman adalah 3,7 kali lebih besar dibandingkan dengan teras yang ditanami rumput dan diberikan residu (Gambar 4). Selain itu erosi, hara nitrogen, dan hara phosphor yang hilang dari teras tanpa perlakuan adalah lebih tinggi dibandingkan dengan teras yang diberi perlakuan rumput dan residu.

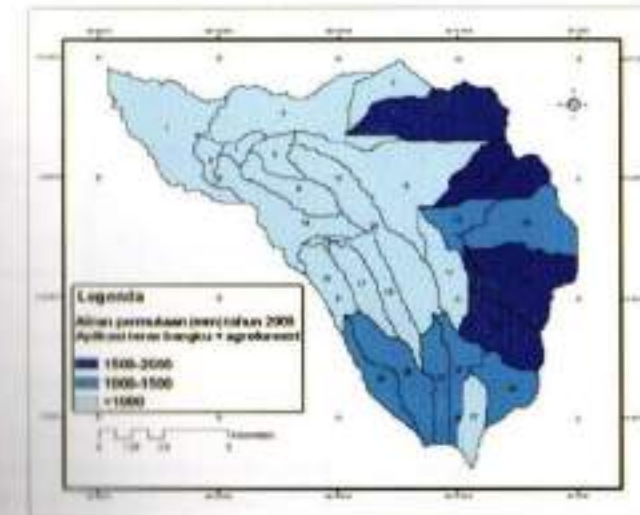


Gambar 4. Aliran permukaan pada plot tanpa perlakuan dan plot yang ditanami rumput dan diberikan residu (Sumber: Sang Arun *et al.* 2006)

Simulasi teknik konservasi di daerah sub DAS Olihung Hulu dengan menggunakan program SWAT menyebutkan bahwa aplikasi kombinasi teras bangku dan agroforestri cukup efektif menurunkan aliran permukaan (Yustika *et al.* 2012). Gambar 5 menunjukkan aliran permukaan tiap sub DAS pada tahun 2009 banyak yang lebih dari 1000 mm. Setelah menerapkan aplikasi teras bangku (pada lahan kebun campuran dan tegalan) dan aplikasi agroforestri (pada kebun teh) maka aliran permukaan dapat dihambat (Gambar 6).



Gambar 5. Aliran permukaan (mm) tahun 2009 (Sumber: Yustika *et al.* 2012)



Gambar 6. Aliran permukaan (mm) tahun 2009 setelah aplikasi teras bangku dan agroforestri (sumber: Yustika *et al.* 2012)

Embung

Embung merupakan tempat pemanenan air hujan ataupun aliran permukaan (*water harvesting*). Embung (Gambar 7) banyak digunakan oleh petani di daerah yang beriklim kering (curah hujan tahunan <1500 mm) karena keberadaan embung memegang peranan dalam keberhasilan pertanian. Pada musim kemarau yang mana terjadi keterbatasan curah hujan, air dalam embung dapat digunakan untuk mengairi lahan pertanian. Dengan demikian musim pertanaman akan lebih lama, karena air tersedia dan keberhasilan panen dapat lebih terjamin. Selain itu, embung dapat meningkatkan simpanan air tanah dan menghambat aliran permukaan. Beberapa hal yang perlu diperhatikan agar pemanfaatan air embung dapat lebih efektif dan efisien (Agus *et al.* 1999) adalah waktu pemberian air, penggunaan bahan organik untuk mempertinggi daya jerap terhadap air, penggunaan mulsa untuk mengurangi evaporasi, pemberian air dengan metode resapan atau tetesan, dan menggunakan tanaman pelindung untuk mengurangi evaporasi.



Gambar 7. Embung sebagai cadangan ketersediaan air (Foto: Rahmah Yustika)

Terdapat 3 tipe embung yaitu embung rakyat, embung desa, dan embung pemerintah (Saadi 2013). Embung rakyat dimiliki oleh individu dan berfungsi untuk mengairi areal persawahan, peternakan, dan kebutuhan rumah tangga. Ketinggian tanggul embung individu sekitar 3 m dengan kemampuan menampung air sekitar 2.500-5.000 m³ dan dapat mengairi lahan irigasi dengan luas areal mencapai 5 ha. Embung desa memiliki bangunan yang lebih besar dan

dibangun oleh sekelompok orang di desa. Embung desa memiliki struktur yang lebih kuat dengan bangunan permanen yang menggunakan semen. Tinggi tanggul embung desa antara 4-8 m dan irigasi dapat mengairi sampai dengan 8 ha. Embung pemerintah merupakan embung yang dibangun dengan struktur yang lebih kompleks yang mempertimbangkan survei, investigasi, pengenalan lahan, konstruksi, operasi, dan pemeliharaan. Tinggi tanggul embung pemerintah dapat mencapai lebih dari 10 m dan menyimpan air lebih dari 1.000.000 m³.

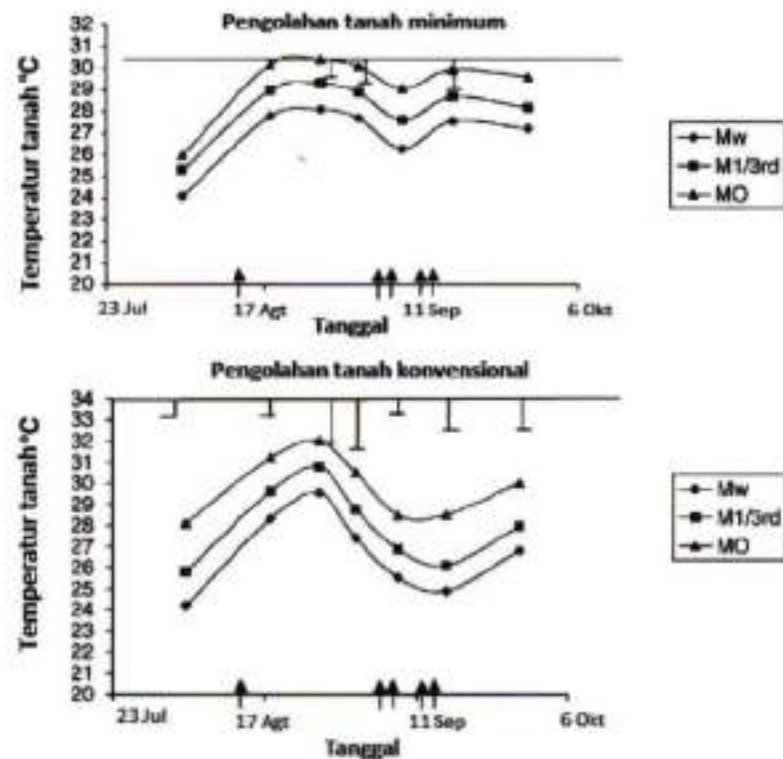
Design konstruksi embung yang tepat dapat berdaya guna secara optimal. Pembuatan embung harus memperhatikan kondisi tanah (permeabilitas), analisis hidrologi dan hidrolika, kondisi topografi, dan struktur bangunan. Selain itu juga harus memperhatikan luas daerah aliran air, letak embung dengan lahan pertanian, dan letak saluran pembuangan utama (Agus *et al.* 1999). Pemeliharaan embung diperlukan untuk menjaga fungsi embung sebagai sumber air irigasi dan memenuhi kebutuhan masyarakat akan tetapi memerlukan biaya yang tidak sedikit. Pemeriksaan embung secara rutin sangat diperlukan agar dapat mengidentifikasi kerusakan kecil yang berpotensi untuk menimbulkan kerusakan dan biaya yang lebih besar (Saadi 2013).

Mulsa

Aktifitas pertanian tanpa penambahan bahan organik dalam jangka waktu panjang dapat menyebabkan penurunan produktivitas tanah karena akan terjadi penurunan kadar C organik dan kadar hara yang dibutuhkan tanaman. Manajemen lahan pertanian hendaknya menambahkan input bahan organik yang bermanfaat bagi perbaikan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Mulsa yang berasal dari sisa-sisa tanaman bermanfaat dalam mengurangi penguapan sehingga kelembapan tanah dapat terjaga. Dengan demikian tanaman dapat memiliki akses terhadap air di dalam tanah yang dibutuhkan. Kelembapan tanah yang terjaga karena aplikasi mulsa dapat memelihara biodiversitas tanah dan aktivitas organisme perombak bahan organik.

Mulsa bermanfaat dalam menstabilkan (*buffer*) temperatur tanah (Agus dan Wibisono 2004). Gambar 8 memperlihatkan bahwa aplikasi mulsa pada seluruh lahan menyebabkan temperatur maksimum terendah diikuti oleh aplikasi mulsa pada 1/3 bagian lahan dan lahan tanpa mulsa. Pada perlakuan mulsa pada seluruh lahan, temperatur minimum tanah pada permukaan tanah lebih rendah 1,4 - 2,4°C dibandingkan dengan perlakuan tanpa mulsa (Bhatt and Khara 2006). Pengolahan tanah minimum dengan berbagai aplikasi teknik pemberian mulsa dapat lebih efektif menjaga kelembapan tanah dibandingkan pengolahan konvensional. Edwards *et al.* (2000) mengemukakan bahwa mulsa jerami dapat

meningkatkan kelembapan tanah hingga 6% lebih besar dibandingkan kontrol. Akan tetapi aplikasi mulsa dalam jumlah kecil tidak dapat mempengaruhi kelembapan tanah (Doring *et al.* 2005).



Keterangan: Mw= aplikasi mulsa pada seluruh lahan, M1/3 rd= aplikasi mulsa pada 1/3 lahan, Mo= tanpa mulsa

Gambar 8. Temperatur tanah maksimum dipengaruhi oleh pengolahan tanah dan berbagai teknik aplikasi mulsa (↑ indikasi curah hujan dan ⊥ indikasi LSD 0,05) (Sumber: Bhatt and Khera 2006)

Bhatt and Khera (2006) menyatakan bahwa mulsa dapat mengurangi aliran permukaan sebesar 33% pada kelerengan 2%. Kondisi demikian dapat terjadi karena mulsa dapat meningkatkan agregasi, memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan infiltrasi. Mulsa juga berperan dalam menghambat laju erosi

pada lahan pertanian. Edwards *et al.* (2000) melakukan percobaan erosi dengan tanaman kentang pada petak berukuran 22.1 m X 4 m dan didapatkan hasil pengaruh mulsa jerami dapat mengurangi erosi hingga 49%. Tanpa mulsa, erosi yang terjadi adalah 270 kg/ha per tahun.

Mulsa juga berfungsi menambah bahan organik di dalam tanah, mendorong sekuestrasi karbon, dan diharapkan dapat memperbaiki pool karbon organik tanah (Gambar 9). Pemberian mulsa merupakan salah satu cara untuk meningkatkan kualitas tanah dan meningkatkan produktivitas tanaman karena dapat memberikan hara yang dibutuhkan oleh tanaman.



Gambar 9. Aplikasi mulsa di lahan pertanian (Foto: Umi Haryati)

Pola Tanam

Banyak faktor yang mempengaruhi petani dalam memilih pola tanam yaitu: serangan hama dan penyakit tanaman, interaksi alelopati antar tanaman, harga, modal, kesesuaian tanaman dengan jenis tanahnya, luas lahan, dan iklim. Pengaruh/ pola tanam yang sesuai dengan intensitas dan distribusi curah hujan merupakan salah satu bentuk adaptasi dalam menghadapi perubahan iklim. Ketidaksiapan iklim menyebabkan berubahnya waktu pertumbuhan tanaman, pola pemilihan tanaman, dan sistem pertanian (*farming system*) yang mengakibatkan berkurangnya akses terhadap pangan. Akan tetapi pemilihan tanaman yang mampu beradaptasi terhadap perubahan iklim dapat mengurangi

kerugian petani. Pembagian pola tanam dengan memperhatikan iklim yaitu (Oldeman 1980 dalam Agus *et al.* 1999; Agus dan Widiyanto 2004):

- Bila bulan kering dalam satu tahun tidak ada atau hanya satu bulan, dapat dilakukan pertanaman sepanjang tahun.
- Bila bulan kering 2-3 bulan setahun, dapat dilakukan pertanaman sepanjang tahun tetapi dengan perencanaan lebih hati-hati.
- Bila bulan kering 4-6 bulan setahun, dapat dilakukan dua kali penanaman dengan tumpang gilir.
- Bila bulan kering 7-9 bulan setahun, pertanaman dapat dilakukan sekali.
- Bila bulan kering 10-12 bulan setahun, daerah tersebut tidak cocok untuk tanaman pangan bila tanpa irigasi atau sistem penerangan air.

Pola tanam majemuk (*multiple cropping*) merupakan suatu sistem pertanian yang menanam lebih dari satu jenis tanaman pada satu waktu. Keuntungan dari pola ini adalah penutupan tanah menjadi lebih besar sehingga mengurangi aliran permukaan dan erosi, mempertinggi intensitas penggunaan lahan, dan memberikan tambahan pendapatan kepada petani.

Respon petani dalam mengganti varietas tanaman yang tahan kekeringan dan jenis tanaman dapat membantu mereka dalam mengatasi resiko kerugian. Pemilihan jenis tanaman dapat menentukan tingkat erosi/hidrologi yang terjadi di suatu lahan pertanian. Percobaan dengan menggunakan simulasi di Midwestern United States menunjukkan bahwa penggantian pola tanam jagung dan gandum dengan kedelai pada tahun 2040-2059 dapat meningkatkan aliran permukaan antara +10% sampai 310% dan erosi mencapai antara +33% hingga +274% dibandingkan tahun 1990-1999 (O'Neal *et al.* 2005).

Badan Litbang Pertanian telah mengantisipasi penurunan produksi pertanian tanaman akibat dampak perubahan iklim. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan (2008) mengembangkan varietas tanaman unggul padi toleran kekeringan (varietas Silugonggo), padi toleran genangan (varietas GH TR1), padi toleran salinitas (varietas Way Apoburu, Margasari, Lambur), padi rendah emisi gas metan (Ciherang, Cisantana, Tukad Balian), jagung toleran kekeringan (Bima-2 Bantimurung, Bima-3 Bantimurung, Lamuru, Sukmaraga), kedelai toleran kekeringan (Burangrang, Argomulyo), kacang tanah toleran kekeringan (Singa), dan kacang hijau toleran kekeringan (Kutilang).

Keterbatasan air merupakan hambatan yang banyak dihadapi di sebagian wilayah Indonesia. Status air pada lahan pertanian merupakan informasi yang dapat digunakan dalam rangka pengembangan pertanian kedepan terutama menghadapi perubahan iklim. Sarvina dan Pramudia (2009) mengidentifikasi periode surplus dan defisit kadar air tanah dan fluktuasi kadar air tanah sebagai

dasar penyusunan pola tanam di Kabupaten Serang. Didapatkan pola tanam yang berbeda pada berbagai kecamatan di Kabupaten Serang seperti satu kali musim tanam padi, satu kali musim tanam palawija, satu kali musim tanam padi dan satu kali musim tanam palawija, dua kali musim tanam palawija dan dua kali musim tanam padi.

Penetapan pola tanam dapat menggunakan kalender tanam untuk menghindari kegagalan panen ataupun rendahnya produktivitas tanaman akibat iklim yang tidak menentu. Pergeseran musim menyulitkan petani untuk memulai pengolahan tanah dan penanaman padi. Badan Litbang Pertanian telah mengembangkan kalender tanam dalam bentuk Atlas Kalender Tanam. Atlas ini mempunyai keunggulan (Runtuwuu dan Syahbuddin 2011) yaitu (a) dinamis, karena disesuaikan dengan beberapa kondisi iklim; (b) operasional pada tingkat kecamatan; (c) spesifik lokasi; (d) mudah dipahami pengguna karena disusun dengan sistem spasial dan tabular. Sedangkan keterbatasan dari Atlas Kalender Tanam yaitu (1) beberapa kecamatan hasil pemekaran belum termasuk ke dalam atlas; (2) ketersediaan data luas tanam padi sangat bervariasi antar kecamatan; (3) ketersediaan data iklim yang terbatas. Untuk lebih memudahkan pengguna (petani, penyuluh, kelompok tani), telah dibuat Kalender Tanam Terpadu dalam versi website. Kalender Tanam Terpadu ini memuat informasi mengenai (1) estimasi waktu dan luas tanaman padi dan palawija; (2) wilayah rawan banjir, kekeringan dan terkena serangan OPT; (3) rekomendasi varietas dan kebutuhan benih; (4) rekomendasi dan kebutuhan pupuk; (5) mekanisasi pertanian; (6) info lahan-BPP; (7) kalender tanam rawa.

Pendukung Teknis Keberhasilan Adaptasi Konservasi Tanah

Kepemilikan Lahan

Petani diharapkan dapat beradaptasi terhadap perubahan iklim dengan mengaplikasikan teknik konservasi tanah. Preferensi petani pemilik dan petani penggarap yang menyewa lahan terhadap konservasi tanah mekanik berbeda. Aplikasi konservasi tanah menyebabkan luas lahan garapan berkurang sehingga hasil panen sedikit banyak akan berkurang.

Seringkali petani penggarap tidak mempunyai preferensi untuk mengaplikasikan teknik konservasi tanah mekanik karena tidak ada keterkaitan dengan lahan usaha setelah masa sewa habis. Berbeda dengan petani pemilik, mereka mempunyai rasa kepedulian lebih besar terhadap lahan mereka. Kepemilikan lahan oleh petani membuat petani peduli akan lahannya dan berusaha untuk beradaptasi terhadap perubahan iklim (Yegbemey *et al.* 2013).

Petani pemilik lahan lebih mempunyai preferensi untuk mengaplikasikan teknik konservasi tanah. Mereka berharap kualitas tanah untuk jangka waktu kedepan akan dapat menunjang produktivitas tanaman. Rasa memiliki yang besar tersebut menyebabkan petani pemilik bersedia untuk menerapkan teknik konservasi tanah meskipun dilakukan secara bertahap karena dibutuhkan input yang tidak sedikit untuk menerapkan teknik konservasi tanah tersebut.

Akses Informasi

Akses informasi teknik konservasi tanah dapat tersebar melalui Penyuluh Pertanian Lapangan (PPL), desiminasi, dan plot percontohan. Penyuluh Pertanian Lapangan bertugas untuk memberikan informasi yang berkembang dalam membangun pertanian. Lembaga Penyuluh Pertanian Lapangan di Desa Pauh Menang Propinsi Jambi memegang peranan penting dalam aspek teknis, sosial, dan ekonomi dalam pengembangan pertanian (Wigena *et al.* 2001). Dengan seringnya kontak antara penyuluh pertanian dengan petani maka petani akan mendapatkan banyak informasi mengenai manfaat konservasi tanah dalam menghadapi perubahan iklim. Komunikasi yang terjalin dapat mempercepat teradopsinya teknologi konservasi tanah.

Desiminasi kegiatan penelitian dapat mensosialisasikan hasil penelitian yang terkait dengan teknik konservasi tanah dalam menghadapi iklim yang tidak menentu. Pembuatan plot percontohan dapat membuat petani mempunyai gambaran dalam menerapkan teknik konservasi sesuai dengan keadaan lahan yang dimiliki. Memodifikasi teknik konservasi yang sudah dikenal petani dan disesuaikan dengan lingkungan agroekosistemnya akan mempunyai peluang keberhasilan lebih tinggi dibandingkan menerapkan teknik konservasi yang tidak dikenal dan masih asing bagi petani (Sutono *et al.* 2001). Penerapan kearifan lokal (*indigenous knowledge*) dapat lebih berhasil karena petani sudah familiar dan memanfaatkan sumber daya di lingkungan sekitar.

Faktor Sosial Ekonomi

Faktor pendidikan dapat memberikan dampak positif terhadap adopsi konservasi tanah. Petani yang memiliki pendidikan yang lebih tinggi dapat lebih mudah menerima perubahan karena cara pandang yang lebih modern. Selain itu, petani yang berusia muda juga lebih mudah menerima perubahan dibandingkan petani yang berusia lebih tua. Akan tetapi pada saat ini jumlah petani muda sangat kurang karena tidak tertarik untuk bekerja di bidang pertanian. Secara ekonomi, pertanian tidak menarik karena keuntungan yang diperoleh minimum. Pertanian yang menghasilkan keuntungan optimal yang didukung oleh teknologi ramah

lingkungan dapat memberikan *feedback* yang menarik *interest* petani muda untuk berusaha di bidang pertanian.

Keadaan Biofisik Lahan

Penerapan teknik konservasi tanah pada lahan pertanian harus memperhatikan kondisi biofisik lahan karena efektifitas dan kelayakan pada tiap lahan dapat berbeda. Pada pembuatan teras bangku diperlukan persyaratan biofisik tanah yang stabil, tidak mudah longsor, solum tanah > 60 cm, kemiringan lahan > 15 dan < 45%, tanah stabil dan subsoil tanah tidak mengandung konsentrasi tinggi kandungan Al, Fe, Mn (Agus *et al.* 1999, Sutono *et al.* 2001). Pada pengolahan tanah minimum, maka tanah yang diusahakan merupakan tanah gembur dan tidak mudah mengalami pemadatan/*compacting*, rekahan/*crusting*. Aplikasi embung dapat diterapkan pada tanah yang mempunyai infiltrasi dan permeabilitas rendah.

Kebijakan Pemerintah

Perlindungan terhadap lahan pertanian diperlukan untuk melindungi eksistensi lahan pertanian. Faktor fragmentasi lahan menyebabkan sempitnya lahan garapan petani. Selain itu terjadi konversi lahan pertanian menjadi penggunaan lahan lainnya yang semakin cepat seiring pertumbuhan ekonomi dan ledakan penduduk.

Kebijakan pemerintah diperlukan agar lahan pertanian dapat terus lestari dan memberikan daya dukung terhadap lingkungan sekitar melalui aplikasi teknik konservasi tanah. Peraturan Pemerintah no. 12 tahun 2012 tentang insentif perlindungan lahan pertanian pangan berkelanjutan mendukung infrastruktur pertanian yang salah satunya meliputi konservasi tanah dan air. Kebijakan tersebut dalam insentif fasilitas kredit untuk pembuatan konservasi pada lahan pertanian dapat mendorong petani untuk memberikan perhatian yang lebih pada lahan yang dimiliki agar dapat memberikan daya dukung yang optimal bagi produktivitas tanaman.

Aspek Biaya Pembuatan Bangunan Konservasi Tanah

Pembuatan teknik konservasi tanah sipil teknis membutuhkan dana untuk tenaga kerja mengerjakannya dan bahan-bahan material. Kendala input biaya seringkali menghalangi keinginan petani untuk menerapkan teknik konservasi. Untuk pembuatan embung dibutuhkan tenaga kerja 200 HOK/embung sedangkan pembuatan teras bangku dibutuhkan 600-1900 HOK/ha (Agus *et al.* 1999).

Sehingga diperlukan perhatian dari pemerintah dalam hal pemberian bantuan kredit ringan yang bisa dijangkau oleh petani.

Penutup

Perubahan iklim mempengaruhi pertanian dalam bentuk lebih seringnya lahan mengalami banjir dan kekeringan, salinitas dan makin tingginya fluktuasi suhu tanah. Berbagai macam teknik konservasi tanah, baik dalam bentuk tindakan sipil teknis maupun vegetatif dapat mengurangi masalah-masalah tersebut. Hal ini pada umumnya terjadi karena tanah yang dikonservasi:

- Permukaannya menjadi terlindung dari pukulan butir hujan karena penggunaan mulsa dan tanaman penutup tanah
- Agregatnya lebih stabil dan tidak mudah pecah sehingga lebih tidak peka terhadap erosi karena berbagai tindakan konservasi yang mampu meningkatkan kandungan bahan organik tanah
- Tanah menjadi tidak mudah tergenang karena daya infiltrasinya meningkat disebabkan peningkatan kandungan bahan organik, perbaikan saluran drainase, dan penggunaan mulsa serta tanaman penutup tanah
- Tanah lebih tidak mudah mengalami kekeringan karena peningkatan ruang pori penyimpan air melalui penerapan pengelolaan bahan organik dan teknologi panen air.

Dibutuhkan suatu upaya agar masyarakat dapat mengenali hubungan antara perubahan iklim dengan berbagai sifat tanah serta berbagai teknologi konservasi yang pada umumnya dapat diterapkan dengan mudah dan dengan biaya yang murah. Umumnya petani dapat mengetahui adanya perubahan iklim dari semakin seringnya perubahan curah hujan yang bergeser waktu dan berubah tingkat intensitasnya. Perubahan pola curah hujan tersebut berpengaruh terhadap hasil panen. Tindakan konservasi tanah dapat mengurangi berbagai dampak tersebut.

Daftar Pustaka

- Agus F, dan Widiyanto. 2004. Petunjuk Praktis Konservasi Tanah Lahan Kering. World Agroforestry Centre (ICRAF) Southeast Asia. Bogor. 102 pp.
- Agus F, A. Abdurachman, A. Rachman, S.H. Tala'chu, A. Dariah, B.R. Prawiradiputra, B. Hafid, dan S. Wiganda. 1999. Teknik Konservasi Tanah dan Air. Sekretariat Tim Pengendali Bantuan Penghijauan dan Reboisasi Pusat. Jakarta.
- Arsyad S. 2010. Konservasi Tanah dan Air. Bogor: IPB Press.

- Bhatt R and Khara KL. 2006. Effect of tillage and mode of straw mulch application on soil erosion in the submontaneous tract of Punjab, India. *Soil & Tillage* 88: 107-115.
- BMKG. 2014. Analisis Kejadian Banjir dan Tanah Longsor di Sulawesi Utara. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Stasiun Klimatologi Kayuwatu Manado.
http://www.bmkg.go.id/BMKG_Pusat/DataDokumen/Analisis_banjir_manado.pdf
- Doring TF, Brandt M, Heb J, Finckh MR, and Saucke H. 2005. Effect of straw mulch on soil nitrate dynamics, weeds, yield and soil erosion in organically grown potatoes. *Field Crop Research* 94: 238-249.
- Edwards L, Burney JR, Richter G, and Mac Rae AH. 2000. Evaluation of compost and straw mulching on soil-loss characteristics in erosion plots of potatoes in Prince Edward Island, Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 81: 217-222.
- Estriyngtyas W, Boer R, dan Buono A. 2009. Analisis hubungan curah hujan dengan kejadian banjir dan kekeringan pada wilayah dengan sistem usaha tani berbasis padi di propinsi Jawa Barat. *J. Agromet.* 23 (1): 11-19.
- Hairiah K, dan Rahayu S. 2010. Mitigasi Perubahan Iklim Agroforestri Kopi untuk Mempertahankan Cadangan Karbon Lanskap. Simposium Kopi, Bali 4-5 Oktober 2010.
<https://www.worldagroforestry.org/sea/publications/files/paper/pp0302-11.pdf>
- Haryati U, Haryono, dan Aburachman A. 1995. Pengendalian erosi dan aliran permukaan serta produksi tanaman pangan dengan berbagai teknik konservasi pada tanah Typic Eutropept di Ungaran, Jawa Tengah. *Pembrik Penelitian Tanah dan Pupuk* 13:40-50.
- Hairiah K, Santjono MA, dan Sabarnudin S. 2003. Pengantar Agroforestri. Bahan Ajaran 1. ICRAF.
- Lat R. 2000. A modest proposal for the year 2001: we can control greenhouse gases and feed world with the proper soil management. *Journal Soil and Water Conservation* 5 (4): 429-433.
- Lat R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623-1627.

- Las I, Surmaini E, dan Ruskandar A. 2008. Antisipasi Perubahan Iklim: Inovasi Teknologi dan Arahan Penelitian Padi di Indonesia. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Padi 2008. Inovasi Teknologi Padi Mengantisipasi Perubahan Iklim Global Mendukung Ketahanan Pangan. BB Padi.
- Maulidah S, Santoso H, Subagyo H, dan Rifqiyyah Q. 2012. Dampak perubahan iklim terhadap produksi dan pendapatan usaha tani cabai rawit (studi kasus di Desa Bulupasar, Kecamatan Pagu, Kabupaten Kediri). *SEPA* 8 (2): 51-182.
- Muryati. 2007. Pengaruh umur buah dan faktor iklim terhadap serangan penggerek buah jeruk *Citripestis sagittiferella* Mr. (Lepidoptera: Pyralidae). *J. Hort.* 17(2): 188-195.
- Nearing MA, Pruski FF, and O'Neal MR. 2004. Expected climate change impacts on soil erosion rates: A review. *Journal of Soil and Water Conservation* 59 (1): 43-50.
- O'Neal MR, Nearing MA, Vining RC, Southworth J, and Pfeifer RA. 2005. Climate change impacts on soil erosion in Midwest United States with changes in crop management. *Catena* 61: 165-184.
- Peraturan Pemerintah no. 12 tahun 2012 Tentang Insentif Perlindungan Lahan Pertanian Pangan Berkelanjutan.
- P3HTA. 1987. Penelitian Terapan Pertanian Lahan Kering dan Konservasi. UACP-FSR. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Departemen Pertanian. Hal. 6.
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. 2008. Kesiapan Varietas Unggul Tanaman Pangan Menghadapi Dampak Perubahan Iklim. *Warta Penelitian dan Pengembangan Pertanian* 30(3): 1-3.
- Runtuwun E, dan Syahbuddin H. 2011. Atlas kalender tanam tanaman pangan nasional untuk menyikapi variabilitas dan perubahan iklim. *Jurnal Sumber daya lahan* 5 (1): 1-10.
- Saadi Y. 2013. Post-construction problems of embung in Lombok island and the operation and maintenance work. *Procedia Engineering* 54: 648-660.
- Sang-Arun J, Mihara M, Horaguchi Y, and Yamaji E. 2006. Soil erosion and participatory remediation strategy for bench terraces in northern Thailand. *Catena* 65: 258-264.

- Sarvina Y, dan Pramudia A. 2009. Analisis neraca air lahan kabupaten Serang sebagai dasar penyusunan pola tanam. *Buletin Hasil Penelitian Agroklimat dan Hidrologi* 6 (1): 1-19.
- Setiawati W, Somantri A, dan Purwati. 2002. Dinamika populasi dan pola infeksi *Liriomyza huidobrensis* Blanchard pada tanaman kentang di musim kemarau dan musim hujan. *J. Hort.* 12(4): 261-269.
- Sudirman, Sinukaban N, Suwardjo H, dan Arsyad S. 1986. Pengaruh tingkat erosi dan pengapuran terhadap produktivitas tanah. *Pembrit. Penelitian Tanah dan Pupuk* 6: 9-14.
- Suwardjo, H. 1981. Peranan Sisa-sisa Tanaman dalam Konservasi Tanah dan Air pada Usaha Tani Tanaman Semusim. *Disertasi Doktor Sekolah Pasca Sarjana Institut Pertanian Bogor*.
- Supriyadi H dan Heryana N. 2011. Dampak perubahan iklim terhadap produksi jambu mete dan upaya penanggulangannya. *Buletin RISTRI* 2(2): 175-186.
- Sutono S, Tala'ohu SH, dan Agus F. 2001. Adaptasi hasil penelitian konservasi tanah dengan keadaan petani (Pengalaman NWMCP). Hal. 199-211 *dalam* Prosiding Seminar Pengelolaan Lahan Kering Berlereng dan Terdegradasi. Bogor, 9-10 Agustus 2001. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Sutono, Suhartono, dan Kurnia U. 1998. Tanaman pagar serang janitan (*Flemingia congesta* Roxb) dan pengaruhnya terhadap sifat fisika tanah ultisol Jasinga. Hal. 129-140 *dalam* Prosiding Pertemuan Pembahasan dan Komunikasi Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat Bidang Fisika dan Konservasi Tanah dan Air serta Agroklimat dan Hidrologi. Bogor, 10-12 Februari 1998. Pusat Penelitian Tanah. Bogor.
- Ugalde D, Brungs A, Kaerbernack A, McGregor A, and Slattery B. 2007. Implications of climate change for tillage practice in Australia. *Soil and Tillage Research* 97: 318-330.
- Van der Kamp J, Yasser I, and Buurman P. 2009. Soil carbon changes upon secondary succession in Imperata grasslands (East Kalimantan, Indonesia). *Geoderma* 149: 76-83.
- Wiguna RP, Santoso D, dan Maryam. 2001. Peningkatan peranan kelembagaan pedesaan untuk mempercepat adopsi teknologi pengelolaan lahan kering. Hal. 229-241 *dalam* Prosiding Seminar Pengelolaan Lahan Kering

Berlereng dan Terdegradasi. Bogor, 9-10 Agustus 2001. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Bogor.

Yegbemey RN, Yabi JA, Tovignan SD, Gantoli G, and Kokoye SEH. 2013. Farmer's decisions to adapt to climate change under various property rights: A case study of maize farming in northern Benin (West Africa). *Land use policy* 34: 168-175.

Yustika RD, Tarigan SD, Hidayat Y, dan Sudadi U. 2012. Simulasi manajemen lahan di DAS Ciliwung Hulu menggunakan model SWAT. *Informatika Pertanian*: 21 (2): 71-79.

Zhang XC, Nearing MA. 2005. Impact of climate change on soil erosion, runoff, and wheat productivity in central Oklahoma. *Catena* 61: 185-195.

Lampiran 1.

No	Aplikasi Teknologi Konservasi	Manfaat Adaptasi Terhadap Perubahan Iklim
1	Pengolahan tanah konservasi	• Mengurangi erosi dan aliran permukaan • Meningkatkan karbon organik tanah • Meningkatkan agregasi dan struktur tanah
2	Agroforestri	• Mengurangi erosi dan aliran permukaan • Menyimpan cadangan air • Meningkatkan cadangan karbon
3	Teras Bangku	• Mengurangi erosi dan aliran permukaan • Meningkatkan infiltrasi air
4	Embung	• Pemanenan air hujan ataupun aliran permukaan • Mengairi lahan pertanian
5	Mulsa	• Mengurangi erosi dan aliran permukaan • Kelembapan tanah dapat terjaga • Berperan dalam temperatur tanah • Meningkatkan cadangan karbon
6	Pola tanam	• Mengurangi erosi dan aliran permukaan • Menghindari kegagalan panen ataupun rendahnya produktivitas • Mengatasi keterbatasan air

2. DINAMIKA CADANGAN KARBON TANAH AKIBAT PERUBAHAN DAN INTENSITAS PENGGUNAAN LAHAN

Al Dariah dan Maswar

Peneliti Balitbangtan di Balai Penelitian Tanah

Pendahuluan

Karbon (C) tanah merupakan salah satu indikator penting kualitas tanah (Doran dan Parkin 1994; Larson dan Pierce 1994; Islam dan Weil 2000), karena peranannya dalam menentukan sifat fisik, kimia, maupun biologi tanah (Hou *et al.* 2012; Liu *et al.* 2011; Bationo *et al.* 2006; Gregorich *et al.* 1994). Oleh karena itu, untuk menjaga tanah dari ancaman degradasi (penurunan kualitas), maka karbon yang tersimpan dalam tanah (cadangan karbon tanah) harus dipelihara dan dipertahankan seoptimal mungkin.

Pada era perubahan iklim, cadangan carbon tanah mempunyai arti yang semakin penting, karena dapat berperan dalam menambat (sequestrasi) dan menyimpan karbon dalam jumlah besar (Mettay *et al.* 2006; Tamochi *et al.* 2009). Secara global, cadangan karbon tanah diperkirakan hampir tiga kali lipat cadangan karbon dalam biomassa (*above ground C stock*), dan sekitar dua kali lipat cadangan karbon di atmosfer (Lal 2004; Eswaran *et al.* 1993). Jika tidak dikonservasi dengan baik, cadangan karbon yang demikian besar ini berpotensi menjadi sumber emisi gas rumah kaca (GRK) dan dapat berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi GRK di atmosfer, yang selanjutnya berdampak terhadap laju perubahan iklim. Oleh karena itu sebagai tindakan mitigasi terhadap terjadinya perubahan iklim, konservasi dan peningkatan cadangan karbon dalam tanah merupakan salah satu opsi yang perlu diprioritaskan. Eswaran *et al.* (2008) menyatakan bahwa faktor manajemen sangat menentukan tingkat cadangan karbon tanah.

Perubahan penggunaan lahan (*landuse change*) merupakan kegiatan yang berpengaruh besar terhadap cadangan karbon tanah (Siringoringo 2013; Powers *et al.* 2004; Guo dan Gifford 2002; Schuman *et al.* 2002; Eswaran *et al.* 1993). Sekitar 40% karbon tanah di daerah tropis berada dalam tanah hutan (*forest soil*). Diperkirakan 20-50% cadangan karbon tanah bisa hilang akibat deforestasi (Eswaran *et al.* 1993). Perubahan penggunaan lahan bercadangan C tinggi ke penggunaan lahan dengan cadangan C lebih rendah, bukan hanya menyebabkan hilangnya cadangan karbon di atas permukaan tanah (*above ground C stock*), namun juga dapat mengganggu stabilitas karbon yang tersimpan dalam tanah akibat terjadinya perubahan lingkungan, yang akhirnya berdampak terhadap terjadinya peningkatan kehilangan karbon tanah, baik melalui proses erosi (akibat peningkatan laju dekomposisi) dan/atau erosi. Perubahan penggunaan lahan (pengolahan tanah, rotasi tanaman, pemupukan)

juga berpengaruh terhadap dinamika cadangan karbon dalam tanah (Houet *et al.* 2012; Schrumph *et al.* 2011; Youkhana dan Idol 2009; Tan *et al.* 2007; IPCC 2006; Metay *et al.* 2006; Dixon dan Turner 1991; Dixon *et al.* 1994). Pengolahan tanah intensif bisa menyebabkan terjadinya kerusakan struktur tanah (Blevins *et al.* 1985), hal ini berdampak terhadap penurunan stabilitas cadangan karbon dalam tanah (Pankhurst dan Lynch 1993; Schrumph *et al.* 2011), karena cadangan karbon menjadi lebih mudah diakses oleh mikroorganisme dekomposer. Bab ini membahas dinamika cadangan karbon dalam tanah akibat perubahan penggunaan lahan dan pengelolaan tanah. Pada akhir bab ini diuraikan berbagai pendekatan penggunaan dan pengelolaan tanah yang direkomendasikan untuk mempertahankan cadangan C tanah.

Cadangan Karbon Tanah

Cadangan karbon tanah (*below ground C-stock*) adalah jumlah atau berat karbon yang tersimpan di dalam tanah pada suatu luasan tertentu. Data utama yang dibutuhkan untuk menghitung cadangan karbon tanah dalam suatu kawasan adalah (1) Berat Isi (BI) atau *bulk density* (BD), yaitu masa atau fase padat tanah pada volume tertentu (g/cm^3 atau kg/dm^3 atau t/m^3); (2) kandungan C organik tanah (% berat atau g/g atau kg/kg); (3) ketebalan tanah (cm atau m); dan (4) luas lahan yang ditaksir cadangan karbonnya (Agus *et al.* 2011).

Cadangan karbon tanah bervariasi antar jenis atau tipe tanah, diantaranya ditunjukkan oleh perbedaan kerapatan karbon (jumlah karbon pada volume tanah tertentu). Agus *et al.* (2009 dan 2011) membandingkan kerapatan karbon pada tanah mineral yang berkisar antara 10–40 kg/m^3 , dan pada tanah gambut berkisar antara 30–70 kg/m^3 . Andisols dan Mollisols merupakan tanah mineral yang mempunyai kerapatan karbon lebih tinggi dibandingkan dengan tanah mineral lainnya. Hasil pengamatan pada beberapa ordo tanah mineral di Pulau Sumatera menunjukkan bahwa kerapatan karbon pada kedalaman tanah 0–30 cm pada tanah Andisol dan Mollisols berkisar antara 41–44 kg/m^3 , sedangkan pada tanah mineral lainnya berkisar antara 17–37 kg/m^3 (Tabel 1).

Selain kerapatan karbon, kedalaman tanah juga menentukan cadangan karbon tanah terutama untuk tanah gambut (Histosols), karena karbon terkonsentrasi pada semua kedalaman; sedangkan pada tanah mineral cadangan karbon umumnya terkonsentrasi pada lapisan atas, khususnya pada kedalaman <30 cm (Batjes 1996; IPCC 2006; Siringoringo 2013). Agus *et al.* (2011) menyatakan pada tanah mineral, cadangan karbon pada kedalaman tanah lebih dari 1 m sudah sangat rendah sehingga dapat diabaikan.

Table 1. Rata-rata BD, kadar C-organik, dan kerapatan karbon (kedalaman 0–30 cm) pada beberapa ordo tanah mineral di Sumatera

Ordo tanah	Rata-rata Berat Isi tanah (t/m^3)	Rata-rata kadar C-organik tanah (%)	Rata-rata kerapatan karbon tanah (kg/m^3)*
Alfisols	$1,23 \pm 0,08$	$1,43 \pm 0,73$	17,59
Entisols	$1,18 \pm 0,24$	$3,18 \pm 2,45$	37,52
Inceptisols	$1,16 \pm 0,16$	$2,34 \pm 1,57$	27,14
Andisols	$0,80 \pm 0,05$	$5,24 \pm 4,17$	41,92
Mollisols	$1,34 \pm 0,10$	$3,28 \pm 1,75$	43,95
Oxisols	$1,04 \pm 0,18$	$2,06 \pm 1,15$	21,42
Spodosols	$0,97 \pm 0,17$	$3,16 \pm 2,54$	30,65
Ultisols	$1,16 \pm 0,11$	$1,86 \pm 1,38$	21,57

Sumber: van Noordwijk *et al.* (1997), Wright and Haslam (2009), FAO (2001), Suprayogo *et al.* (2008), Ingegnier and Horn (2006), LREF 1 dalam Shofiyati *et al.* 2010.

*Dikitung dengan persamaan: $\text{CD} = \text{BD} \times \text{C}$, dimana CD = kerapatan karbon tanah, BD = berat isi tanah, dan C = kadar C organik tanah

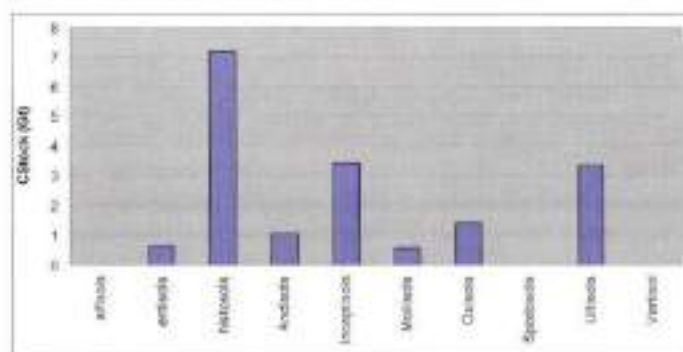
Eswaran *et al.* (1993) mengestimasi total cadangan karbon pada tingkat global adalah sekitar 1576 Pg, 32% diantaranya (506 Pg) tersimpan dalam tanah-tanah di daerah tropika (Tabel 2). Hasil estimasi ini didasarkan pada cadangan karbon sampai kedalaman 1 m (satu meter), sehingga untuk tanah Histosols hasil estimasinya menjadi *underestimate*, karena banyak ditemukan cadangan karbon Histosols lebih dari 1 m, dengan cadangan karbon yang relatif sama pada setiap kedalaman.

Tabel 2. Cadangan karbon dalam tanah pada tingkat global

Ordo	Area		C-Organik		Tropik
	Global	Tropik	Global	Tropik	
	10^3 km^2		Pg		% global
Histosols	1.745	286	357	100	28
Andisols	2.552	1.683	78	47	60
Spodosols	4.878	40	71	2	3
Inceptisols	11.772	11.512	119	119	100
Entisols	1.287	2.189	19	11	58
Alfisols	11.743	9.117	110	29	26
Oxisols	11.330	9.018	105	85	81
Mollisols	9.480	234	72	2	3
Ultisols	18.283	6.114	127	30	24
Spodosols	21.580	4.565	352	60	17
Entisols	14.981	3.256	148	19	13
Alfisols	7.644	1.358	18	2	11
Total	115.215	49.669	1.576	506	32

Sumber: Eswaran *et al.* (1993). Estimasi dilakukan sampai kedalaman tanah 1 m

Pada tingkat nasional, Shofiyati *et al.* (2010) mengestimasi total cadangan karbon pada tanah mineral dengan luas 162 juta ha (data pada 18,5% areal tidak tersedia) adalah 17,6 Gt, sedangkan pada tanah gambut dengan luasan 21 juta ha adalah sekitar 7,1 Gt (Gambar 1). Estimasi (baik untuk tanah mineral maupun tanah gambut) dilakukan sampai kedalaman 30 cm, sehingga khusus untuk tanah gambut, hasil estimasi ini juga menjadi *underestimate*, karena menurut Wahyunto *et al.* (2010) kedalaman gambut di Indonesia berkisar antara 0,5–12 m. Hasil penelitian Wahyunto *et al.* (2003 dan 2004) di Sumatera dan Kalimantan dan Agus *et al.* (2009) di Kalimantan Barat menunjukkan rata-rata cadangan karbon dalam tanah gambut berturut-turut berkisar antara 2.000–3.000 t/ha dan 1.100–3.000 t/ha. Perkiraan luasan gambut Indonesia juga telah dikoreksi, dari 20,6 juta ha (Wahyunto *et al.* 2003; 2004; dan 2007) menjadi sekitar 14,9 juta ha (Ritung *et al.* 2011). Bila diasumsikan ketebalan gambut Indonesia rata-rata 3–4 m dan setiap satu m mempunyai cadangan C sebanyak 600 t/ha, maka cadangan C tanah gambut Indonesia berkisar antara 27–36 Gt (Agus *et al.* 2013a). Jaenicke *et al.* (2008) memperkirakan karbon tersimpan pada lahan gambut di Indonesia sekitar 55 Gt.



Gambar 1. Estimasi cadangan karbon tanah Indonesia pada kedalaman 0–30 cm (Sumber: Shofiyati *et al.* 2010)

Pada Sektor Pertanian, konservasi cadangan karbon tanah yang demikian besar bukan hanya berperan dalam mendukung mitigasi emisi GRK, namun juga sangat menentukan keberlanjutan (*sustainability*) pertanian. Senyawa organik yang merupakan komponen utama cadangan karbon tanah sangat berpengaruh positif terhadap kualitas tanah (Doran dan Parkin 1994; Larson dan Pierce 1994; Islam dan Weil 2000), baik fisik, kimia, maupun biologi, sehingga kondisi tanah menjadi kondusif untuk perkembangan dan produksi tanaman. Selain itu daya adaptasi pertanian terhadap berbagai perubahan yang bersifat ekstrim (termasuk perubahan iklim) juga menjadi lebih baik, di antaranya sebagai efek kemampuan

senyawa karbon dalam meningkatkan kemampuan tanah memegang air. Oleh karena itu, Agus (2012) menyatakan bahwa konservasi karbon bukan hanya menjadi isu global, tetapi menjadi isu yang sangat relevan dengan keseharian petani dan pembangunan nasional (termasuk pembangunan di sektor pertanian).

Faktor-Faktor yang Berpengaruh terhadap Cadangan Karbon Tanah

Hasil penelitian Liu *et al.* (2011) pada skala regional di Cina menunjukkan bahwa curah hujan, temperatur, ketinggian tempat (*elevasi*), kandungan liat dan debu, dan penggunaan lahan merupakan faktor yang berpengaruh nyata terhadap kerapatan karbon tanah. Temperatur dan curah hujan merupakan variabel iklim yang sangat berpengaruh terhadap kerapatan karbon tanah (Homann *et al.* 1995; Alvarez dan Lavado 1998; Liu *et al.* 2011), karena pengaruhnya terhadap jumlah dan kualitas residu organik yang dihasilkan. Dua variabel iklim ini juga sangat menentukan laju dekomposisi bahan organik (Quideau *et al.* 2001; Hevia *et al.* 2003).

Tanah-tanah Andisols di Indonesia yang mempunyai kerapatan karbon relatif tinggi (Tabel 1) umumnya terdapat di wilayah pegunungan (*elevasi* tinggi dan temperatur rendah). Hasil penelitian Liu *et al.* (2011) juga menunjukkan kandungan karbon yang lebih tinggi pada tanah di daerah pegunungan (*elevasi* relatif tinggi dan suhu relatif rendah) dan daerah lembah (*valleys*) dengan *elevasi* rendah dan curah hujan tinggi. Pengaruh iklim terhadap cadangan karbon tanah juga ditunjukkan oleh nilai *default* (nilai acuan) cadangan karbon tanah yang dikembangkan IPCC (2013). Data cadangan karbon pada Tabel 3 menunjukkan bahwa rata-rata cadangan karbon tanah di daerah beriklim sedang (*temperate*) lebih tinggi dibanding daerah tropis. Tanah di daerah tropis lembap dan tropis pegunungan lebih tinggi dibandingkan dengan di tropis basah atau kering.

Tabel 3. *Default reference* (ambang batas) cadangan karbon untuk tanah mineral (kedalaman 0–30 cm) di lahan basah (*wetland mineral soil*) dengan vegetasi alami

Iklim dan	Cadangan karbon (t/ha)	Standar deviasi	Jumlah lokasi (n)
Batang	116	94	6
Temperate, dingin, kering	87	na	na
Temperate, dingin, lembap	128	55	55
Temperate, hangat, kering	74	45	45
Temperate, hangat, lembap	135	101	101
Tropis, kering	22	11	11
Tropis, lembap	68	45	45
Tropis, basah	49	27	27
Tropis, pegunungan	82	73	73

Sumber: IPCC (2013)

Curah hujan yang tinggi umumnya berasosiasi dengan pertumbuhan vegetasi yang relatif tinggi, sehingga berpengaruh terhadap peningkatan input dan akumulasi bahan organik. Hasil penelitian Liu *et al.* (2011) menunjukkan kerapatan karbon nyata lebih tinggi pada daerah dengan curah hujan >500 mm dibandingkan dengan wilayah dengan curah hujan <500 mm. Namun demikian Lal (2004) menyatakan bahwa curah hujan bisa berpengaruh negatif terhadap cadangan karbon tanah, jika peningkatan curah hujan berdampak terhadap peningkatan erosi, sehingga menyebabkan terangkutnya serasah dan partikel tanah yang banyak mengandung bahan organik.

Tekstur tanah (utamanya kandungan liat) juga merupakan faktor yang berpengaruh terhadap cadangan karbon tanah. Hasil penelitian Liu *et al.* (2011) menunjukkan tingginya kandungan liat dan debu (fraksi <20 μ) selalu berasosiasi dengan kerapatan karbon yang tinggi. Fraksi ini mempunyai kemampuan untuk berikatan secara kimia dengan senyawa organik. Senyawa organik juga bisa terlindungi secara fisik karena ada proses pelapisan atau pemerangkapan (Paul dan van Veen *dalam* Siringoringo 2013; Tisdale dan Oades 1982) atau berada dalam bentuk *particulate organic matter*, sehingga sulit diakses mikroorganisme atau gangguan lainnya.

Selain faktor lingkungan, faktor manajemen sangat berpengaruh terhadap cadangan karbon tanah. Kedua faktor tersebut menentukan tingkat keseimbangan (*balance*) antara masukan (input) karbon ke dalam tanah (dalam bentuk bahan organik) dan tingkat kehilangan karbon dari dalam tanah dalam bentuk CO₂ (proses emisi), karbon terlarut dan erosi (Mettay *et al.* 2006; Smith 2008; Cole *et al.* 1993; Dixon dan Turner 1991).

Strategi untuk memelihara dan meningkatkan cadangan karbon tanah diantaranya adalah (1) meningkatkan kesuburan tanah dan menjaga pH tanah dalam kondisi netral; (2) mengoptimalkan lahan pertanian eksisting dan meminimalkan ekstensifikasi; (3) preservasi (pelestarian) lahan basah dengan cadangan karbon tinggi (misalnya lahan gambut); (4) meminimalkan gangguan dan menahan bahan organik dalam tanah; (5) agro-aforestasi; dan (6) menerapkan sistem olah tanah konservasi (Dixon *et al.* 1994).

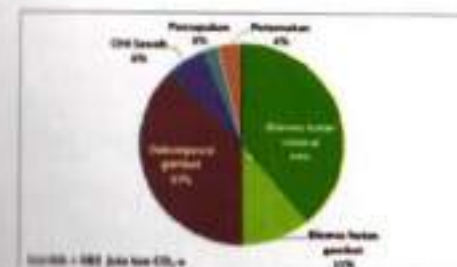
Dinamika Cadangan Karbon Tanah Akibat Perubahan Penggunaan Lahan

Pengembangan lahan hutan (khususnya hutan tropis) menjadi lahan pertanian merupakan isu yang selalu mengundang kontroversi. Banyak data menunjukkan penurunan kualitas lingkungan secara cepat, setelah dilakukan pembukaan dan pembudidayaan lahan hutan. Pembukaan lahan hutan sering kali sulit dihindari, seiring dengan laju pertumbuhan penduduk yang sulit dibendung (utamanya di negara-negara berkembang), kebutuhan lahan terus meningkat diantaranya untuk pengembangan lahan pertanian. Beberapa argumen menyatakan bahwa dengan teknologi yang tepat, kestabilan ekosistem akan tetap dapat terpelihara

setelah hutan tersebut beralih guna menjadi lahan pertanian (Lal 1986). Beberapa hal yang hilang (seperti keragaman hayati/biodiversity) diharapkan dapat dikompensasi jika produktivitas lahan secara ekonomi dapat dipertahankan.

Di era perubahan iklim, kontroversi terhadap alih fungsi hutan semakin kuat, karena kontribusinya terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca, sebagai akibat pelepasan cadangan karbon, baik yang tersimpan dalam bentuk *above ground carbon stock* (karbon yang tersimpan dalam biomas, nekromas, serasah) maupun *below ground carbon stock* (karbon yang tersimpan dalam tanah). Paustian *et al.* (2000) mengestimasi laju akumulasi karbon di atmosfer sebesar 3,5 Pg/tahun, proporsi terbesar dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil dan konversi hutan tropis ke lahan pertanian. Cadangan karbon tanah di daerah tropis juga relatif lebih rentan terhadap perubahan penggunaan lahan, dengan tingkat pemulihan yang lebih lambat dibanding daerah beriklim sedang (Trumbore 1993; Six *et al.* 2002).

Berdasarkan periode tahun dasar (*base year*) 2006-2011, Agus *et al.* (2013b) menunjukkan besarnya kontribusi sektor berbasis lahan (khususnya dari kegiatan perubahan penggunaan lahan dan penggunaan lahan gambut) dalam menyumbang emisi gas rumah kaca pada tingkat Nasional (Gambar 2). Emisi akibat perubahan penggunaan lahan khususnya yang bersumber dari hilangnya cadangan karbon yang tersimpan dalam biomas tanaman (baik pada lahan gambut maupun mineral) adalah sekitar 341 juta ton CO₂-e, dan yang berasal dari tanah gambut akibat penggunaan lahan gambut adalah sekitar 37% (128 juta ton CO₂-e/ha). Dalam perhitungan ini, emisi karbon yang bersumber dari cadangan karbon tanah mineral belum diperhitungkan, karena diasumsikan relatif kecil dibanding emisi yang bersumber dari tanah gambut. Beberapa peneliti menyatakan bahwa erosi merupakan penyebab utama terjadinya penurunan cadangan karbon tanah mineral (Eswaran *et al.* 1993; Ojima *et al.* 1993; Cole *et al.* 1993; Dixon dan Turner 1991).



Gambar 2. Kontribusi emisi tahunan dari berbagai sub-sektor pada sektor berbasis lahan pada periode tahun dasar (*base year*) 2006-2011 (Agus *et al.* 2013b)

Sebagian peneliti menyatakan bahwa karbon yang terbawa erosi hanya mengalami perpindahan tempat (*translokasi/displaced*), sehingga hampir tidak berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Dampak erosi yang sering diperhitungkan adalah dari aspek penurunan kualitas tanah, salah satunya akibat senyawa karbon dan unsur hara yang ada dalam tanah terangkut bersama sedimen. Dampak lebih luas terbatas pada terjadinya sedimentasi dan pencemaran, utamanya pada badan-badan air tempat sedimen ditranslokasi. Namun belakangan ini, beberapa peneliti menyatakan bahwa sebagian dari C-organik yang terbawa erosi teremis dalam bentuk gas rumah kaca (GRK) (Schlesinger *dalam* Lal 2004). Lal (1995 dan 2003) dan Jacinthe dan Lal (2001) mengestimasi sekitar 20-30% dari bahan organik yang berpindah tempat (*displaced*) teremis sebagai GRK, sehingga erosi memberikan kontribusi terhadap peningkatan emisi GRK. Oleh karena itu aplikasi teknik konservasi tanah bukan hanya berfungsi untuk pencegahan erosi, namun juga merupakan tindakan mitigasi emisi GRK, karena peranannya dalam mendukung konservasi karbon tanah.

Proses dan Tingkat Perubahan Cadangan Karbon Tanah Akibat Perubahan Penggunaan Lahan

Konversi lahan hutan menjadi lahan pertanian diawali dengan penebangan vegetasi hutan, yakni menyingkirkan dan seringkali juga disertai dengan membakar hampir semua tanaman yang pada mulanya menutup permukaan tanah dengan relatif rapat. Sebagai akibat dari aktivitas ini, permukaan tanah menjadi terbuka dan mendapat pengaruh langsung dari radiasi matahari dan curah hujan, sehingga resiko bahaya erosi meningkat. Roche *dalam* Lal (1986) melaporkan bahwa erosi dari suatu *small catchment* di Guyana, Perancis meningkat secara drastis setelah dilakukannya penebangan hutan (*deforestation*). Hasil observasi yang dilakukan pada skala petak kecil juga menunjukkan bahwa penebangan vegetasi alami telah menyebabkan terjadinya peningkatan koefisien runoff 25-100 kali, sementara itu, erosi meningkat pula sampai lebih dari 10 kali lipat (Roose 1986). Peningkatan erosi dan run-off juga berdampak terhadap peningkatan pengangkutan lapisan tanah yang kaya hara dan C organik.

Permukaan tanah yang menjadi lebih terbuka juga menyebabkan terjadinya fluktuasi suhu dan regim kelembapan tanah menjadi lebih besar. Dampak pembukaan hutan terhadap perubahan iklim meso/mikro, diantaranya ditunjukkan oleh perbedaan nilai kelembapan relatif (Tabel 4), dampak selanjutnya yang terjadi akibat perubahan ini adalah terjadinya peningkatan pelepasan C (*carbon release*), sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan kadar CO₂ di atmosfer (Palm *et al.* 1986).

Tabel 4. Perbandingan nilai kelembapan udara relatif harian (%) antara lahan hutan dengan lahan hutan yang telah dibuka (*clearing*) di IITA, Ibadan

Vegetasi	Minggu sesudah pembukaan hutan					
	1	8	15	22	29	36
<i>Clearing</i>	42	25	44	61	64	61
Hutan	56	31	55	74	84	84

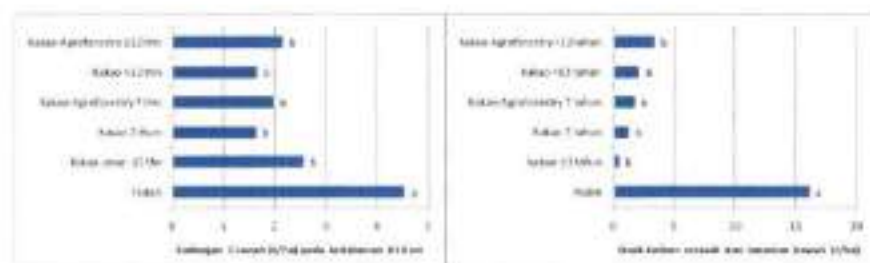
Sumber: Lawson (1986)

Pada tanah gambut, perlakuan drainase yang kerap menyertai pembukaan hutan untuk budi daya pertanian, merupakan salah satu penyebab perubahan lingkungan mikro, perubahan dari kondisi anaerob menjadi aerob, menyebabkan kondisi lingkungan menjadi lebih kondusif untuk aktivitas mikroorganisme dekomposer, sehingga terjadi peningkatan laju emisi karbon tanah. Sebagai contoh, emisi pada lahan gambut yang digunakan untuk perkebunan kelapa sawit di Jambi, umur 6 dan 15 tahun dengan kedalaman drainase sekitar 50-70 cm berturut-turut sebesar 38±9 dan 34±16 t CO₂/ha/tahun (Dariah *et al.* 2013), sedangkan untuk lahan hutan primer gambut yang tidak terpengaruh drainase, emisi dari dekomposisi tanah organik diasumsikan sama dengan nol (IPCC, 2006). Belum banyak data yang menunjukkan perbedaan emisi karbon dari tanah mineral pada saat bervegetasi hutan dibandingkan dengan setelah dilakukan alih fungsi lahan hutan.

Pada tingkat global, Eswaran (1993) menyatakan akibat deforestasi telah terjadi penurunan cadangan karbon tanah sebesar 20-50%. Berdasarkan hasil review 74 publikasi Guo dan Gifford (2002) menunjukkan bahwa telah terjadi perubahan dinamika cadangan karbon tanah akibat perubahan penggunaan lahan dari padang rumput/*pasture* menjadi tanaman tahunan/*plantation* (-10%), hutan alami menjadi tanaman tahunan (-13%), hutan alami menjadi tanaman semusim/crop (-42%), dan padang rumput menjadi tanaman semusim (-59%). Peningkatan cadangan karbon tanah terjadi akibat perubahan tanaman semusim menjadi padang rumput (+19%), tanaman semusim menjadi tanaman tahunan (+18%), serta tanaman semusim menjadi hutan sekunder (+53). Powers *et al.* (2004) menyatakan bahwa pada skala global nilai 20-25% sering digunakan untuk menghitung penurunan cadangan karbon tanah akibat perubahan penggunaan lahan hutan menjadi padang rumput, dan angka 30-50% untuk penurunan cadangan karbon tanah akibat konversi hutan menjadi lahan tanaman pangan. Tidak ada penjelasan secara detail perubahan tersebut terjadi pada berapa waktu berapa lama setelah konversi lahan.

Hasil penelitian Monde (2009) di DAS Nopu, Sulawesi Tengah menunjukkan dinamika cadangan karbon akibat perubahan hutan menjadi lahan pertanian beberapa selang waktu setelah terjadi konversi lahan, diindikasikan bahwa cadangan karbon tanah pada lahan hutan yang berbeda nyata

dibanding lahan kakao. Input bahan organik, diantaranya yang bersumber dari serasah dan tanaman bawah yang nyata berbeda antara hutan dengan lahan kakao, merupakan salah satu penyebab penurunan cadangan karbon tanah, setelah hutan berubah fungsi menjadi lahan kakao (Gambar 3). Hasil penelitian Jiao *et al.* (2012) menunjukkan bahwa setelah 5, 10, 15, 20, 35, dan 50 tahun pertanaman tanaman semusim, kerapatan karbon tanah pada kedalaman 0-30 cm mengalami penurunan sebesar berturut-turut 17%, 12%, 19%, 47%, 46%, dan 48% dibandingkan dengan padang rumput.



Gambar 3. Cadangan karbon tanah pada kedalaman tanah 0-10 cm dan cadangan karbon dalam serasah dan tanaman bawah pada lahan hutan dan kakao di DAS Nopu, Kec. Palolo, Kab. Sigi, Sulawesi Tengah (Sumber: Monde 2009)

Kepekaan tanah terhadap erosi juga menentukan tingkat kehilangan cadangan karbon akibat perubahan penggunaan lahan. Data pada Tabel 5 menunjukkan perbedaan cadangan karbon pada lahan hutan dan lahan usahatani kopi pada tanah dengan tingkat erodibilitas yang berbeda. Rasio cadangan karbon tanah (kopi terhadap hutan) lebih rendah pada tanah yang mempunyai erodibilitas tanah relatif lebih tinggi, hal ini mengindikasikan bahwa perubahan cadangan karbon akibat perubahan penggunaan lahan lebih drastis pada daerah dengan potensi erosi tinggi. Pada tanah mineral belum banyak hasil penelitian yang dapat menunjukkan kontribusi proses emisi sebagai faktor penyebab perubahan cadangan karbon tanah akibat perubahan penggunaan lahan.

Tabel 5. Perubahan cadangan karbon akibat perubahan penggunaan lahan pada tanah dengan tingkat erodibilitas yang berbeda

Penggunaan Lahan	Ds. Laksana, Kec. Sumberjaya, Kab. Lampung Barat (Indeks erodibilitas=0,08)			Ds. Bodong, Kec. Sumberjaya, Kab. Lampung Barat (Indeks erodibilitas=0,17)		
	C-organik tanah (%)	BD (t/m ³)	Cadangan C tanah (t/ha)	C-organik tanah (%)	BD (t/m ³)	Cadangan C tanah (t/ha)
Hutan	6,2	0,68	42,14	6,8	0,67	45,56
Kopi muda	3,7	0,82	30,34	2,2	1,06	23,32
Kopi dewasa	4,3	0,78	33,54	2,4	1,01	24,24
Rasio:						
Kopi muda/hutan	0,60	-	0,72	0,32	-	0,51
Kopi dewasa/hutan	0,69	-	0,80	0,35	-	0,53

Keterangan: Kondisi lereng dan erosivitas hujan pada dua lokasi penelitian relatif sama. Sumber: Darjah *et al.* 2004

Perubahan cadangan karbon tanah akibat perubahan penggunaan lahan seringkali bersifat spesifik, oleh karena itu Powers *et al.* (2004) menyatakan bahwa hasil pengamatan pada skala percobaan (*field scale*) tidak dapat langsung diekstrapolasi pada skala yang lebih luas (pada skala regional atau global). Halnya, tingkat perubahan cadangan karbon tanah sebagai respon terhadap perubahan penggunaan lahan di daerah tropis berbeda dibanding temperate. Pada tipe tanah yang berbeda, misalnya tingkat perubahan cadangan karbon setelah pembukaan lahan pada tanah gambut dan mineral juga sangat berbeda, diantaranya karena kepekaan kedua jenis tanah ini terhadap terjadinya perubahan juga berbeda.

Setelah lahan hutan dibuka dan dimanfaatkan sebagai lahan pertanian produktif, maka aspek manajemen sangat menentukan tingkat cadangan karbon tanah. Berdasarkan hasil pengukuran cadangan karbon pada kedalaman tanah 0-10 cm di 87 areal lahan produktif, Causarano *et al.* (2008) menyimpulkan bahwa variasi cadangan karbon tanah dominan dipengaruhi oleh faktor manajemen (40%), sedangkan faktor lingkungan relatif kecil pengaruhnya, misalnya, batuan di permukaan dan temperatur hanya menjelaskan 5,2% dan 1% dari variasi cadangan karbon tanah di lokasi penelitian.

Dinamika Cadangan Karbon Akibat Perbedaan Intensitas Penggunaan Lahan

Cadangan karbon tanah, selain dipengaruhi oleh perubahan vegetasi dan tingkat pertumbuhannya, juga dipengaruhi oleh tingkat gangguan mekanis pada tanah (Causarano *et al.* 2011; IPCC 2006; West and Post 2002). Pengelolaan tanah merupakan aspek penggunaan lahan yang banyak menimbulkan gangguan terhadap tanah. Dampak gangguan mekanis yang timbul akibat pengolahan tanah diantaranya adalah terjadinya peningkatan aerasi tanah dan

perubahan iklim mikro (temperatur, kelembapan) tanah lapisan atas (*top soil*), yang berdampak terhadap peningkatan laju dekomposisi bahan organik tanah (Balesdent *et al.* 2000). Pankhurst dan Lynch (1993) menemukan bahwa pengolahan tanah dapat memicu perkembangan mikroba aerobik (biasanya bakteri) yang memiliki metabolisme tinggi, sehingga mengakibatkan berkembangnya fauna pemakan bakteri, sehingga terjadi peningkatan dekomposisi bahan organik dan mineralisasi hara. Gangguan mekanis yang terjadi saat proses pengolahan tanah juga bisa merusak struktur tanah. Bahan organik tanah yang terlindung dalam agregat tanah menjadi terekspos, dan menjadi mudah diakses bakteri dekomposer. Peningkatan erosi yang terjadi akibat pengolahan tanah (Suwardjo 1981) juga merupakan salah satu penyebab penurunan cadangan karbon tanah pada lahan yang diolah secara intensif.

Untuk mengurangi dampak negatif dari pengolahan tanah, telah dikembangkan sistem pengolahan tanah yang dapat meminimalisir gangguan mekanis terhadap tanah, sistem pengolahan tanah tersebut dikenal sebagai sistem olah tanah konservasi (*conservation tillage*). Tanpa olah tanah (*zero tillage*), olah tanah seperlunya (*reduce tillage*), dan olah tanah strip (*strip tillage*) dapat digolongkan sebagai sistem olah tanah konservasi (Sinukaban 1990). Pada sistem olah tanah konservasi peningkatan cadangan karbon bisa terjadi karena adanya masukan bahan organik ke dalam tanah yang bersumber dari penggunaan mulsa atau tanaman penutup yang menjadi salah satu ciri dari aplikasi sistem olah tanah konservasi (Rachman *et al.* 2004; Utomo 1995; Suwardjo *et al.* 1981).

Beberapa hasil penelitian menunjukkan efektivitas olah tanah konservasi dalam mengkonservasi dan meningkatkan penambatan (sekuestrasi) karbon dalam tanah. Data pada Tabel 6 menunjukkan dinamika cadangan karbon tanah pada periode lima tahun dengan dua sistem pengolahan tanah yang berbeda. Pada sistem tanpa olah tanah cadangan karbon tanah mengalami peningkatan sebanyak 0,84 t C/ha, sedangkan pada *disc tillage* cadangan karbon mengalami penurunan (-0,54 t C/ha). Berdasarkan data tersebut dapat disimpulkan bahwa dibanding pengolahan tanah secara konvensional (*disc tillage*), sistem tanpa olah tanah mampu mengsekuestrasi karbon sebanyak 0,35 t/ha/tahun.

Tabel 6. Perubahan cadangan karbon tanah selama periode tahun 1998 dan 2003 pada perlakuan tanpa olah tanah (*no-tillage*) dan pengolahan tanah konvensional (*disc-tillage*)

Perlakuan	Kandungan C ^a (g/kg tanah)		SD tanah (g/cm ³)		Cadangan C (t/ha)		Perubahan C (2003-1998) ^b (t C/ha)	Perubahan (NT-DT) ^c (t C/ha/tahun)
No Tillage	14,50±0,14	17,55±2,85	1,30	1,27	21,45	22,29	0,84	0,35
Disc Tillage	14,65±0,64	15,09±1,96	1,23	1,25	20,48	19,94	-0,54	-

^a rerata dan standar error untuk 12 ulangan (6 per plot)

^b perbedaan rerata evolusi C diantara 1998-2003 untuk setiap perlakuan berbeda nyata berdasarkan t-test pada tingkat peluang 5%

^c rata-rata pengkayaan tahunan C antar tahun 1998-2003 dihitung berdasarkan 4 siklus penanaman

NT = No Tillage (tanpa olah tanah); DT = Disc Tillage
Sumber: Murty (2006)

Hasil penelitian Causarano *et al.* (2008) menunjukkan perbedaan cadangan karbon tanah (kedalaman 0-20 cm) berdasarkan hasil kuantifikasi di 87 lahan pertanian produktif dibandingkan dengan padang rumput (*pasture*), yaitu: padang rumput (38,9 t/ha) > olah tanah konservasi (27,9 t/ha) > olah tanah konvensional (22,2 t/ha) (P<0,02). Studi kasus yang dilakukan Powlson *et al.* (1991) menunjukkan peningkatan C organik tanah sebesar 310±180 kg C/ha/tahun, sebagai respon terhadap pengurangan intensitas pengolahan tanah.

Hasil penelitian lainnya (Tabel 7) menunjukkan kemampuan sistem olah tanah konservasi dalam mengsekuestrasi atau meningkatkan cadangan karbon tanah (dibandingkan dengan sistem pengolahan tanah konvensional) yang berkisar antara 0,27-0,48 t/ha/tahun. Berdasarkan review dari 67 percobaan jangka panjang, West dan Post (2002) menyimpulkan bahwa tanah dapat mengsekuestrasi karbon sebanyak 57±14 g C/m²/tahun setelah terjadi perubahan sistem pengolahan tanah, yaitu dari sistem olah tanah konvensional menjadi tanpa olah tanah jika disertai dengan pengembalian residu tanaman sebagai mulsa. Berdasarkan hasil pengamatan selama periode 1972 dan 2000, Tan *et al.* (2001) menyimpulkan bahwa tingkat perubahan cadangan karbon tanah sebagai respon terhadap perlakuan pengolahan tanah sangat ditentukan oleh kandungan C organik tanah awal (*baseline soil organic carbon*). Tanah yang mempunyai kandungan C organik lebih tinggi, cenderung memberikan respon yang lebih baik terhadap perlakuan olah tanah konservasi khususnya dalam menekan emisi karbon.

Tabel 7. Tingkat sekuestrasi karbon tanah pada sistem olah tanah konservasi dibandingkan dengan sistem pengolahan tanah konvensional

Lokasi	Sekuestrasi (t C/ha/tahun)	Sumber
Amerika Serikat bagian tenggara	0,42±0,46	Franzluebbers 2005
Amerika Serikat bagian tengah	0,48±0,59	Johnson <i>et al.</i> 2005
Amerika Serikat bagian barat daya	0,30±0,21	Martens <i>et al.</i> 2005
Amerika Serikat bagian barat laut dan Kanada bagian barat	0,27±0,19	Liebig <i>et al.</i> 2005

Agroforestri merupakan sistem pengelolaan lahan dengan intensitas gangguan mekanis relatif rendah, sehingga akan berperan dalam mengkonservasi dan meningkatkan cadangan karbon tanah (Dixon *et al.* 1994; Albrecht dan Kanji 2003). Kehilangan karbon tanah melalui erosi juga bisa ditekan, karena tingkat erosi pada sistem agroforestri relatif kecil dibanding sistem pertanian monokultur (Hairiah dan Widiyanto 2007). Suplai bahan organik ke dalam tanah pada sistem agroforestri juga relatif lebih terjamin (Albrecht dan Kanji 2003).

Agroforestri adalah salah satu sistem penggunaan lahan yang terdiri dari campuran pepohonan, semak dengan atau tanpa tanaman semusim dan temak dalam satu bidang lahan yang sama (Hairiah dan Widiyanto 2007). Berdasarkan definisi ini, sistem usaha tani yang berbasis tanaman tahunan (pohon-pohonan, buah-buahan, perkebunan) dapat digolongkan sebagai agroforestri. Besarnya karbon yang tersimpan dalam sistem tersebut (termasuk cadangan karbon tanah) tidak bisa menyerupai hutan alami, namun jauh lebih baik dari pada sistem pertanian monokultur (Hairiah dan Widiyanto 2007), terutama monokultur tanaman semusim. Data pada Tabel 8, menunjukkan peningkatan cadangan karbon (kedalaman 0-10 cm) pada berbagai sistem pertanaman kayu-kayuan. Sebagai pembanding, hasil penelitian Siringoringo (2013) di Bogor, menunjukkan cadangan karbon organik tanah (kedalaman 0-30 cm) pada hutan tanaman *Acacia mangium* Willd (dengan periode 4 tahun) meningkat 8,8 t/ha (dari 66,1 t/ha menjadi 74,9 t/ha), dengan laju sekuestrasi karbon ke dalam tanah sebesar 2,3 t/ha/tahun (2,3% per tahun). Hasil penelitian Monde (2009) di DAS Nopu, Sulawesi Tengah (Gambar 3) juga menunjukkan indikasi cadangan karbon pada kakao-agroforestri relatif lebih tinggi dibanding kakao monokultur.

Tabel 8. Peningkatan cadangan karbon tanah (0-10 cm) pada berbagai sistem pertanaman kayu-kayuan (umur 5 tahun) pada tanah Ferric Acrisol, di Togo, Afrika

Spesies tanaman	Peningkatan C-organik tanah (t/ha)
<i>Acacia auriculiformis</i>	3,41
<i>Albizia lebbek</i>	5,21
<i>Adirachta indica</i>	12,46
<i>Casia slamea</i>	5,20

Sumber: Drechsel *et al.* dalam Albrecht dan Kanji 2003

Penutup

Pada era perubahan iklim, karbon yang tersimpan dalam tanah mempunyai arti yang semakin penting, karena selain menentukan tingkat kualitas tanah, juga merupakan cadangan karbon dalam jumlah besar. Jika tanah tidak dikelola dengan baik, karbon yang tersimpan tersebut bisa berubah menjadi sumber emisi gas rumah kaca, sehingga dapat berkontribusi dalam mempercepat laju pemanasan global. Faktor lingkungan dan pengelolaan sangat berpengaruh terhadap dinamika cadangan karbon tanah. Kedua faktor tersebut menentukan tingkat keseimbangan (*balance*) antara masukan (input) karbon ke dalam tanah (dalam bentuk bahan organik) dan tingkat kehilangan karbon dari dalam tanah dalam bentuk gas rumah kaca (GRK) utamanya CO₂.

Perubahan penggunaan lahan bercadangan karbon tinggi ke penggunaan lahan dengan cadangan C lebih rendah, bukan hanya menyebabkan hilangnya cadangan karbon di atas permukaan tanah (*above ground C-stock*), namun juga dapat mengganggu stabilitas karbon yang tersimpan dalam tanah akibat terjadinya perubahan lingkungan, yang akhirnya berdampak terhadap terjadinya peningkatan kehilangan karbon tanah, baik melalui proses emisi (akibat peningkatan laju dekomposisi) maupun erosi. Perubahan tingkat masukan karbon ke dalam tanah dalam bentuk bahan organik, juga berkontribusi terhadap dinamika cadangan karbon akibat perubahan penggunaan lahan.

Intensitas penggunaan lahan (misalnya pengolahan tanah) menentukan tingkat gangguan mekanis terhadap tanah, sehingga berpengaruh terhadap dinamika cadangan karbon tanah. Beberapa hasil penelitian menunjukkan agroforestri lahan konservasi dalam menekan tingkat kehilangan dan meningkatkan penimbunan (sekuestrasi) karbon tanah di lahan pertanian. Agroforestri juga merupakan sistem pengelolaan lahan pertanian dengan intensitas gangguan mekanis relatif rendah, sehingga dapat berperan dalam mengkonservasi dan meningkatkan cadangan karbon tanah. Kehilangan karbon tanah melalui erosi juga bisa ditekan, karena tingkat erosi pada sistem

agroforestri relatif kecil dibanding sistem pertanian monokultur. Suplai bahan organik ke dalam tanah pada sistem agroforestri juga relatif lebih terjamin.

Daftar Pustaka

- Agus F, I.E. Henson, B.H. Sahardjo, N. Harris, M. van Noordwijk, and T.J. Kileen. 2013a. Review of emission factors for assessment of CO₂ emission from land use change to oil palm in Southeast Asia. Round Table on Sustainable Palm Oil, Kuala Lumpur, Malaysia. p.7-28.
- Agus, F., I. Santoso, S. Dewi, P. Setyanto, dan Y. Widiawati. 2013b. Emisi BAU dan mitigasi semua sub-sektor berbasis lahan. Hal. 71-77 dalam Landasan Ilmiah Panduan Teknis Perhitungan Emisi dan Serapan Gas Rumah Kaca Sektor Berbasis Lahan pada Skenario Business As Usual (BAU) dan Aksi Mitigasi. Bappenas, Republik Indonesia.
- Agus, F. 2012. Konservasi Tanah dan Karbon Untuk Mitigasi Perubahan Iklim Mendukung Keberlanjutan Pembangunan Pertanian. Orasi Profesor Research. Bogor, 26 September 2012. Badan Litbang Pertanian. Kementerian Pertanian. 68 hal.
- Agus, F., K. Hairiah, dan A. Mulyani. 2011. Panduan Metode Pengukuran Karbon Tersimpan di Lahan Gambut. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian. Kementerian Pertanian dan World Agroforestry Center, SEA. Bogor. 58 hal.
- Agus, F., E. Runtunuwu, T. June, E. Susanti, H. Komara, H. Syahbuddin, I. Las, and M.V. Noordwijk. 2009. Carbon dioxide emission in land use transitions to plantation. Jurnal Litbang Pertanian 28(4): 119-126.
- Albrecht, A. and S.T. Kanji. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry system. Agriculture and Ecosystems and Environment. Elsevier 99:15-27.
- Alvarez, R. and R.S. Lavado. 1998. Climate, organic matter and clay content relationship in the Pampa and Chaco soils, Argentina. Geoderma 83: 127-141.
- Balesdent, J., C. Chenue, dan M. Balabane. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. Soil and Tillage Research 53: 215-230.
- Bationo, A., J. Kihara, B. Vanlauwe, B. Waswa, and J. Kimetu. 2006. Soil organic carbon dynamic, functions, and management in West African agro-ecosystems. Agriculture Systems. Elsevier. Doi:10.1016/j.agisys.2006.08.011.
- Batjes, N.H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. Eur. J. of Soil Sci. 47:151-163.
- Blevins, R.L., W.W. Frye, and M.S. Smith. 1985. The effect of conservation tillage on soil properties. P.99-109. In F.M. D'itri (Ed.). A System Approach to Conservation Tillage. Lewis Publishers Inc. USA.
- Causarano, H.J., A.J. Franzluebbers, J.N. Shaw, D.W. Reeves, R.L. Raper, and C.W. Wood. 2008. Soil organic carbon fraction and aggregation in Southern Piedmont and Coastal Plain. SSSAJ. 72 (1):221-230.
- Cole, C. V., K. Flach, J. Lee., D. Sauerbeck, and B. Stewart. 1993. Agricultural sources and sinks of carbon. Water Air Soil Poll. 70: 111-122.
- Dariah, A., S. Marwanto, and F. Agus. 2013. Peat CO₂ emission from oil palm plantations, separating root respirations. Mitigation and Adaptation Strategic for Global Change. Doi. 10. 1007/S110 21/013/95915/6.
- Dariah, A. 2004. Tingkat Erosi dan Kualitas Tanah pada Lahan Usahatani Berbasis Kopi di Sumberjaya, Lampung Barat. Desertasi. Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Ellen, H.K., J.K. Winjun, K.J. Andrasko, J.J. Lee, and P.E. Schreeder. 1994. Integrated landuse system: Assesment of promising agroforest and alternative landuse practises to enhance carbon conservation and sequestration. Climatic Change 27: 71-92.
- Ellen, R. E. and Turner, D. R. 1991. The global carbon cycle and climate change: responses and feedbacks from below-ground systems. Environm. Poll. 73: 245-262.
- Ellen, I.W., and T.B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. In J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek., and B.A. Stewart (Eds.). Defining Soil Quality for Sustainable Environment. SSSA, Madison, Wisconsin, USA. Special Publication 35:3-21.
- Emmer, H., E.V.O. Berg, and P. Reich. 1993. Organic carbon in soils in the world. Soil Sci. Soc. Am. J. 57: 192-194.
- FAO. 2001. Lecture Note on The Major Soil of The World. World Soil Resources Report 94. FAO.
- Fitzpatrick, A.J. 2005. Soil organic sequestration and agricultural GHG emission 1980-2000 in the Southern USA. Soil Tillage Res. 83:120-147.
- Gill, J.B. and R.H. Gifford. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. Global Change Biology 8(4): 345-360. doi:10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x.

- Gregorich, E.G., M.R. Carter, D.A. Angers, C.M. Monreal, and B.H. Ellert. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *J. Soil Sci.* 74: 367-385. Doi: 10.4141/cjss 94-051.
- Hairiah, K. dan Widiyanto. 2007. Adaptasi dan mitigasi pemanasan global melalui pengelolaan diversitas pohon di lahan-lahan pertanian. Hal 1-12 *dalam* F. Agus, N. Sinukaban, N. Gintings, H. Santoso, dan Sutadi (Eds.). Bunga Rampai Konservasi Tanah. Masyarakat Konservasi Tanah Indonesia.
- Hervaa, G.G., D.E. Buschiazzo, and E.N. Heppera. 2003. Organic matter in size fractions of soils of the semiarid Argentina. Effects of climate, soil texture and management. *Geoderma* 116: 265-277.
- Homann, P.S., P. Sollins, H.N. Chappell, and A.G. Stangenberger. 1995. Soil organic carbon in a mountainous, forested region: relation to site characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1468-1475.
- Hou, R., Z.O.Y. Li, D.D. Tyler, F. Li, and G.F. Wilson. 2012. Effect of tillage and residue management on soil organic carbon and total nitrogen in the North China Plain. *Soil & Water Management & Conservation. SSSAJ*, 76(1).
- IPCC. 2006. Agriculture, forestry and other land use. Vol 4 *in* S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara dan Tanabe (Eds.). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IGES. Japan.
- IPCC. 2013. Supplement to the 2006. *In* T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, B. Jamsranjav, M. Fukuda, and T. Troxer (Eds.). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. WMO, UNEP. IPCC Switzerland.
- Islam, K.R. and R.R. Weil. 2000. Soil quality indicator properties in Mid-Atlantic Soils as influenced by conservation management. *J. Soil and water Cons.* 55(1): 69-78.
- Jacinthe and R. Lal. 2001. A mass balance approach to assess carbon dioxide evolution during erosion event. *Land Degrad. Dev.* 12:329-339.
- Jaenicke, J., J.O. Rieley, C. Mott, P. Kimman, and F. Siegert. 2008. Determination of the amount of carbon stored in Indonesian peatlands. *Geoderma* 147: 151-158.
- Jiao, Y., Z. Xu, J.H. Zhao, and W.Z. Yang. 2012. Change in soil carbon stocks and related soil properties along a 50-year grassland-to-cropland conversion chronosequence in an agropastoral ecotone of inner Mongolia, China. *Journal of Arid Land* 4(4): 420-430.

- Johnson, J.M.F., D.C. Reicosky, R.R. Allmaras, T.J. Sauer, R.T. Venterea, and C.J. Dell. 2005. Greenhouse gas contribution and mitigation potential of agriculture in central USA. *Soil Tillage Res.* 83:73-94.
- Lal, R. 2004. Carbon emission from farm operation. *Environ. Int.* 30: 981-990.
- Lal, R. 2003. Soils and the global carbon budget. *Environ. Int.* 29: 437-450.
- Lal, R. 1995. Global soil erosion by water and carbon dynamic. p. 131-141 *In* R. Lal, J.M. Kimble, E. Levine, B.A. Stewart (Eds.). *Soil and Global Change*. Florida. CRC. Lewis.
- Lal, R. 1986. Deforestation and soil erosion. p. 299-316. *In* R. Lal, P.A. Sanchez, R.W. Cummings, JR (Ed.). *Land Clearing and Development in The Tropics*. A.A. Balkema/ Rotterdam/Boston.
- Larson, W.E. and F.J. Pierce. 1994. The dynamic of soil quality as a measure of sustainable management. p 35: 38-51. *In* Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. SSSA Special Publication.
- Lewson, T.L. 1986. Deforestation and induced changes in meso/micro climate. p. 195-202. *In* R. Lal, P.A. Sanchez, R.W. Cummings, JR (Ed.). *Land Clearing and Development in The Tropics*. A.A. Balkema/ Rotterdam/Boston.
- Liitig, M.A., J.A. Morgan, J.D. Reeder, B.H. Ellert, H.T. Gollany, and G.E. Schman. 2005. Greenhouse gas contribution and mitigation potential of agriculture practices in northwestern USA and western Canada. *Soil Tillage Res.* 83:25-52.
- Liu, Z., M. Shao, and Y. Wang. 2011. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stock across the loess plateau region, China. *Agriculture, Ecosystems, and Environment* 142:184-194.
- Martins, D.A., W. Emmerich, J.E.T. McLain, and T.N. Johnson, Jr. 2005. Atmospheric carbon mitigation potential of agricultural management in Southwestern USA. *Soil Tillage Res.* 83: 86-93.
- Hatley, A., J.A.A. Mareira, M. Bernoux, T. Boyer, J.M. Douzet, B. Feigl, C. Feller, F. Maraux, R. Oliver, and E. Scopel. 2006. Storage and form of organic carbon in no-tillage under cover crop system on clayey Oxisol in dryland rice production (Cerrados, Brazil). *Soil Tillage Res.* Doi:10.1016/j.still.2006.07.009.
- Harada, A. 2009 Degradasi stok karbon (C) akibat alih guna lahan hutan menjadi lahan kakao di DAS Nopu, Sulawesi Tengah. *J. Agroland* 16 (2):110-117.

- Ojima, D.S., W.J. Parton, D.S. Schimel, J.M.O. Scurlock, and T.G.F. Kittel. 1993. Modeling the effects of climatic and CO₂ changes on grassland storage of soil C. *Water, Air, and Soil Pollution* 70: 643-657.
- Palm, C.A., R.A. Houghton, J.M. Mello, D. Skole and G.M. Woodwell. 1986. The effect of tropical deforestation on atmospheric CO₂. p. 181-194. *In* R. Lal, P.A. Sanchez, R.W. Cummings, JR. (Eds.). *Land Clearing and Development in The Tropics*. A.A. Balkema/ Rotterdam/Boston.
- Pankhurst, C.E. and J.M. Lynch. 1993. The role of soil biota in sustainable agriculture. p. 3-9. *In* C.E. Pankhurst, B.M. Doebe, V.V.S.R Gupta, dan P.R. Grace (Eds.). *Soil Biota: Management in Sustainable Farming System*. CSIRO Press, Melbourne, Australia.
- Paustian, K. J. Six, E.T. Elliot, and H.W. Hunt. 2000. Management option for reducing CO₂ emission from agriculture soils. *Biochemistry* 48: 147-163.
- Polwson, D.S., A. Bhogal, B.J. Chambers, K. Coleman, A.J. Macdonald, K.W.T. Goulding, and A.P. Whitmore. 2011. The potential to increase soil carbon stock through reduced tillage or organic material addition in England and Wales: A Case Study. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 146:23-33.
- Powers, J.S., J.M. Read, J.S. Denslow, and S.M. Guzman. 2004. Estimating soil carbon flux following land cover change: a test of some critical assumption for a region in Costa Rica. *Global Change Biology*. 10:170-181. Doi:10.1111/1365-8817.2003.00736.x.
- Quideau, S.A., Q.A. Chadwick, A. Benesi, R.C. Graham, R.C., and M.A. Anderson. 2001. A direct link between forest vegetation type and soil organic matter composition. *Geoderma* 104 : 41-60.
- Rachman, A., A. Dariah, dan E. Husen. 2004. Olah tanah konservasi. Hlm 189-210 *dalam* U. Kurnia, A. Rachman, dan A. Dariah (Eds.). *Teknologi Konservasi Tanah pada Lahan Kering*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Badan Litbang Pertanian. Departemen Pertanian. Jakarta.
- Ritung, S., Wahyunto, K. Nugroho, Sukarman, Hikmatullah, Suparto, dan C. Tafakresnanto, C. 2011. Peta Lahan Gambut Indonesia Skala 1:250.000. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian. Bogor.
- Roose, E.J. 1986. Runoff and erosion before and after clearing depending on the type of crop in Western Africa. p. 317-330. *In* R. Lal, P.A. Sanchez, and R.W. Cummings, JR (Eds.). *Land Clearing and Development in The Tropics*. A.A. Balkema/Rotterdam/Boston.

- Seguel O, and R. Horn. 2006. Strength regain in soil aggregate beds by swelling and shrinkage. *Int. Agrophysics* 20: 161-172.
- Schrumpf, M., E.D. Schulze, K. Kaiser, and J. Schumacher. 2011. How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories?. *Biogeosci. Discuss.* 8: 723-769.
- Schuman, G.E., H.H. Janzen, and J.E. Herrick. 2002. Soil carbon dynamic and potential carbon sequestration by rangeland. *Environmental Pollution* 116:391-396.
- Shohiyati, R., I. Las, and F. Agus. 2010. Indonesia soil data base and predicted stock of soil carbon. *In* Proc. International Workshop on Evaluation and Sustainable Management of Soil Carbon Sequestration In Asian Country. Bogor, Indonesia. 28-29 September 2010.
- Susukaban, N. 1990. Pengaruh pengolahan tanah konservasi dan pemberian mulsa jerami terhadap produksi tanaman pangan dan erosi hara. *Pembrit. Penel. Tanah dan Pupuk* 8:31-37.
- Suslingo, H.H. 2013. Potensi sekuestrasi karbon organik pada pembangunan hutan tanaman *Acacia mangium Willd.* *Jurnal Penelitian Hutan Konservasi Alam* 10 (2): 193-213.
- Tk, J., C. Feller, K. Deneff, J.D.C. Sa, S.M. Ogle, and A. Albrecht. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effects of no-tillage. *Agronomic* 22: 755- 775.
- Smith, P., D. Martino Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, B. Scholes, O. Sirotenko, M. Howden, T. McAllister, G. Pan, V. Romanenkov, U. Schneider, S. Towprayoon, M. Wattenbach, and J. Smith. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B. Biological Sciences* 363: 789-813.
- Suslingo D., Widiarto, G. Cadisch, and M. van Noordwijk. 2008. A Pedotransfer Resource Database (PTFRDB) for tropical soils: test with the water balance of WaNULCAS. www.worldagroforestrycentre.org/SEA/Publications/files/paper/PP0002-04. Last retrieval 19 September 2010.
- Susanto, H. 1981. Peranan Sisa-sisa Tanaman dalam Konservasi Tanah dan Air pada Usaha-tani Tanaman Semusim. Disertasi Doktor Sekolah Pasca Sarjana Institut Pertanian Bogor.
- Tao, Z., X. Liu, Z. Li, and T.R. Loveland. 2007. Simulated responses of soil organic carbon to tillage management scenarios in Northwest Great Plains. *Carbon Balance and Management*. Doi:10.1186/1750-0680-2-7.

- Tarnocai, C., J.G. Canadell, E.A.G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova, and S. Zimov. 2009. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* 23:9-11.
- Tisdall, J.M. and J.M. Dades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil sci.* 33:141-163.
- Trumbore, S.E. 1993. Comparison of carbon dynamics in tropical and temperate soils using radio carbon measurements. *Global Biogeochemical Cycles* 7: 275-290.
- Utomo, M. 1995. Kekerasan tanah dan serapan hara tanaman jagung pada olah tanah konservasi jangka panjang. *J. Tanah. Trop.* 1:1-7.
- Van Noordwijk, M., C. Cerri, P.L. Woomer, K. Nugroho, and M. Bernoux. 1997. Soil carbon dynamics in the humid tropical forest zone. *Geoderma* 79: 187-225.
- Wahyunto, A. Dariah, dan F. Agus. 2010. Distribution, properties, and carbon stock of Indonesian Peatland. hal 187-204. *In Proc. International Workshop on Evaluation and Sustainable Management of Soil Carbon Sequestration in Asian Country*. Bogor, Indonesia. 28-29 September 2010.
- Wahyunto, S. Ritung, dan H. Subagio, H. 2003. Map of Peatland Distribution Area and Carbon Content in Sumatera 1990-2002. *Wetlands International - Indonesia Programme*, Bogor & Wildlife Habitat Canada.
- Wahyunto, S. Ritung, Suparto, dan Subagio. 2004. Map of Peatland Distribution Area and Carbon Content in Kalimantan 2000-2002. *Wetlands International - Indonesia Programme*, Bogor & Wildlife Habitat Canada.
- Wahyunto, H. Subagio, S. Ritung, and H. Bakti. 2007. Map of Peatland Distribution Area and Carbon Content in Papua. *Wetlands International - Indonesia Programme*, Bogor & Wildlife Habitat Canada.
- West, T.O., and W.M. Post. 2002. Soil organic sequestration rate by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1930-1946. Doi: 10.2136/sssaj2001.1930.
- Wright AL and E.A. Hanlon. 2009. Soil Structure in Everglades Agricultural Area Histosols: Effects on Carbon Sequestration and Subsidence. Publication #SL 301. University of Florida.
- Youkhana, A. and T. Idol. 2009. Tree pruning mulch increase soil C and N in a shaded coffee agroecosystem in Hawaii. *Soil Biol. And Biochemist* 41: 2527-2534.

3. TEKNOLOGI PENINGKATAN CADANGAN KARBON LAHAN KERING DAN POTENSINYA PADA SKALA NASIONAL

Neneng L. Nurida dan Jubaedah

Peneliti Balitbangtan di Balai penelitian tanah

Pendahuluan

Kebutuhan pangan nasional untuk memenuhi 237 juta jiwa penduduk saat ini relatif besar, sementara itu, lahan pertanian subur yang produktif (optimal) sudah sangat terbatas. Lahan yang potensial untuk pertanian masih tersedia cukup luas yaitu sekitar 122,1 juta ha, yang terdiri dari lahan kering masam seluas 108,8 juta ha (89,1%) dan lahan kering iklim kering seluas 13,3 juta ha atau 10,9% (BBSDL 2012). Lahan kering merupakan salah satu agroekosistem yang potensial untuk dimanfaatkan secara optimal sehingga mampu mendukung terwujudnya kemandirian pangan di masa depan. Pengembangan pertanian di lahan kering akan menghadapi tantangan yang cukup berat mengingat pertanian di lahan kering sangat rentan terhadap perubahan iklim.

Lahan kering di Indonesia dapat dibedakan menjadi lahan kering masam dan lahan kering iklim kering. Lahan kering masam dicirikan dengan pH < 5, C-organik tanah dan tingkat kesuburan tanah rendah dengan curah hujan relatif tinggi (> 2000 mm/tahun), dan intensitas pengusahaan cukup tinggi (Rochayati dan Dariah 2012). Lahan kering iklim kering dicirikan dengan terbatasnya ketersediaan air akibat curah hujan yang sangat rendah, hujan bersifat eratik, dan di beberapa wilayah mengandung bahan organik atau C-organik tanah yang rendah. Pada umumnya lahan kering baik lahan kering masam maupun lahan kering iklim kering di Indonesia telah mengalami degradasi dan salah satunya disebabkan erosi dan kurang tepatnya pengelolaan pertanian (Suwardjo dan Nurida 1993).

Staten *et al.* (1997) menyatakan bahwa degradasi tanah akibat pengelolaan tanah dimanifestasikan melalui erosi, penurunan kadar bahan organik tanah, kehilangan hara, pemadatan tanah, dan penurunan populasi mikroorganisme. Sementara itu Arsyad (1989) mengemukakan bahwa kerusakan tanah dapat terjadi diantaranya karena kehilangan unsur hara dan bahan organik dari daerah perakaran dan erosi. Akibat degradasi lahan, pada umumnya status lahan organik lahan kering di Indonesia berada pada level rendah-sangat rendah (Arshad *et al.* 2008). Penurunan kadar bahan organik di dalam tanah dapat berdampak buruk pada sifat-sifat tanah tersebut, sehingga kadar bahan organik dapat dijadikan sebagai salah satu parameter penting dalam kaitannya dengan

tingkat kesuburan tanah (Sombroek dan Nacktergaele 1993). Rendahnya bahan organik, khususnya fraksi labil karbon organik berkorelasi dengan buruknya sifat fisik dan kimia tanah lainnya seperti berat isi (*bulk density*), ruang pori total, pori aerasi, dan K tersedia (Nurida 2006).

Posisi Indonesia yang terletak di wilayah tropis mengakibatkan laju dekomposisi bahan organik tergolong tinggi karena suhu dan kelembaban yang lebih sesuai untuk perkembangan organisme dekomposer. Laju kehilangan bahan organik dari lingkungan tanah relatif tinggi. Tingginya curah hujan di wilayah lahan kering masam serta sifat hujan yang eratik di wilayah lahan kering iklim kering, menyebabkan kandungan bahan organik di lahan kering tergolong sangat rendah-rendah. Keberlanjutan pengusahaan tanah secara intensif pada lahan kering yang telah mengalami degradasi sangat tergantung pada upaya konservasi bahan organik, agar kualitas tanah dapat terjaga dan keberlanjutan usaha tani dapat terjamin (Suwardjo dan Snukaban 1986). Upaya perbaikan kualitas tanah yang relatif murah adalah pemanfaatan sumber bahan organik *in situ*, seperti pengembalian sisa tanaman. Penambahan bahan organik secara terus menerus dan terdistribusi secara baik sepanjang tahun sangat diperlukan untuk meningkatkan suplai bahan organik ke dalam tanah dan untuk mengimbangi jumlah yang hilang dari tanah yang tidak dapat dihindari, khususnya pada tanah-tanah yang telah mengalami degradasi.

Fungsi Karbon Organik Tanah

Karbon organik merupakan bagian fungsional dari bahan organik tanah yang mempunyai fungsi dan peranan sangat penting di dalam menentukan kesuburan dan produktivitas tanah melalui pengaruhnya terhadap sifat fisik, kimia dan biologi tanah. Penambahan bahan organik tanah atau karbon organik tanah merupakan salah satu usaha untuk memperbaiki tanah terdegradasi. Bahan organik tanah erat kaitannya dengan kondisi ideal tanah baik secara fisik, kimia, dan biologi yang selanjutnya menentukan produktivitas suatu tanah (Wander *et al.* 1994). Menurut Lal (1994), tanah memiliki produktivitas yang baik apabila kadar bahan organik berkisar antara 8 sampai 16% atau kadar karbon organik 4,56% sampai 9,12%.

Bahan organik merupakan sumber utama unsur-unsur hara esensial yang dihasilkan dari proses dekomposisi dan mineralisasi bahan organik. Semakin tinggi laju dekomposisi bahan organik atau semakin cepat *turn over* bahan organik maka semakin cepat unsur hara menjadi tersedia (Cambardella dan Elliot 1992; Obi 1999). Selain meningkatkan ketersediaan unsur hara dari hasil dekomposisinya, Stevenson (1982) menyatakan peranan bahan organik terhadap

sifat kimia tanah adalah: (1) membentuk kelat dengan ion logam penting seperti Cu, Fe, Al, dan Mn, sehingga menjadi bentuk yang stabil dalam tanah dan pada kondisi tanah tertentu dapat dimanfaatkan tanaman atau mikroorganisme tanah; (2) sebagai penyangga perubahan pH tanah; (3) meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) tanah; dan (4) bereaksi dengan senyawa organik lain seperti senyawa dari pestisida atau herbisida yang dapat menyebabkan perubahan bioaktivitasnya.

Pengaruh pemberian bahan organik dalam memperbaiki sifat-sifat kimia tanah juga ditunjukkan oleh berbagai penelitian. Pemberian bahan organik *Flemingia congesta* mampu mempertahankan kadar bahan organik tanah dan KTK tanah (Sukristyonubowo *et al.* 1993), meningkatkan pH dan P-tersedia (Irianto *et al.* 1993), sedangkan pemberian jerami padi mampu meningkatkan kadar N tanah (Sudarsono 1991; Utomo *et al.* 1992). Hasil penelitian Situmorang (1999) menunjukkan bahwa penambahan *Mucuna sp.* dan alang-alang mampu meningkatkan Ca, Mg, K dan Na serta menurunkan Al_{d3} dan Fe_{d3} .

Berbagai penelitian menunjukkan perbaikan sifat-sifat fisik tanah akibat pemberian bahan organik antara lain meningkatnya persentase partikel tanah yang berbentuk agregat (Suwardjo *et al.* 1989), meningkatnya persentase agregat mantap yang berukuran besar dan menurunkan persentase agregat yang berukuran lebih kecil, serta menurunkan berat isi (Oades 1990; Kurnia 1996; Zhang *et al.* 1997), meningkatnya stabilitas agregat (Kurnia 1995; Lu *et al.* 1998; Obi 1999) dan menurunkan tahanan penetrasi tanah (Purnomo *et al.* 1992).

Bahan organik merupakan sumber energi bagi makro dan mikro organisme tanah. Sumber energi berupa bahan organik yang cukup merupakan salah satu faktor yang menentukan agar mikroorganisme dapat tumbuh dan berkembang (Anas *et al.* 1997). Perbaikan sifat fisik dan kimia tanah akibat pemberian bahan organik dapat mempengaruhi kehidupan organisme di dalam tanah karena lingkungan fisik dan kimia tanah dapat berpengaruh langsung terhadap jenis dan jumlah mikroorganisme. Biomassa mikroorganisme berkaitan erat dengan kadar bahan organik tanah sehingga sangat dipengaruhi oleh penambahan bahan organik seperti sisa tanaman dan pupuk kandang (Frankenberger dan Arshad 1997). Pengaturan kuantitas dan kualitas input residu tanaman sangat mempengaruhi biomassa mikroorganisme. Semakin besar peningkatan input residu tanaman, semakin besar peningkatan biomassa mikroorganisme tanah pada lapisan atas (Dafal 1998; Rasiah dan Key 1999).

Perbaikan tanah pertanian terdegradasi dapat dicapai salah satunya melalui penambahan bahan organik sehingga terjadi peningkatan kadar bahan organik tanah secara bertahap. Akumulasi bahan organik tanah sekaligus upaya

konservasi karbon tanah mampu memperbaiki kualitas lahan terdegradasi yang pada akhirnya dapat berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas komoditas strategis. Optimalisasi lahan kering terdegradasi diharapkan mampu mengakselerasi tercapainya ketahanan pangan berkelanjutan dan kedaulatan pangan di Indonesia

Siklus Bahan Organik Tanah (C-organik Tanah)

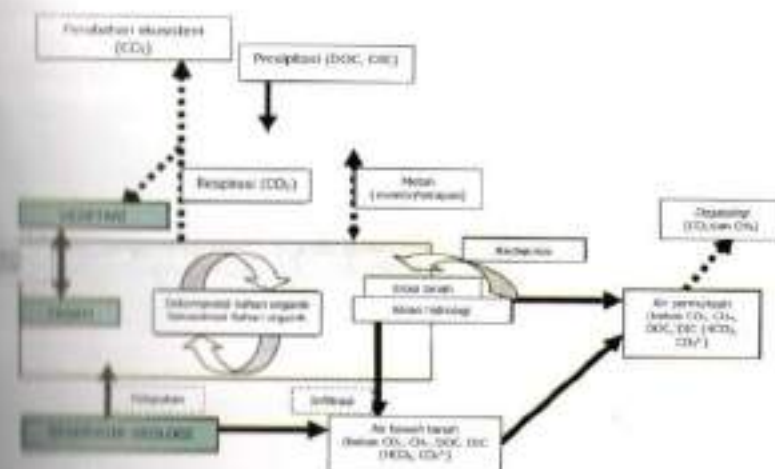
Dalam sistem pertanian berkelanjutan, bahan organik tanah memegang peranan penting khususnya dalam meningkatkan kualitas tanah. Kadar bahan organik tanah pada waktu tertentu ditentukan oleh keseimbangan antara penambahan bahan organik dan kehilangan melalui dekomposisi dan pencucian, yang selanjutnya dapat menunjukkan apakah terjadi penurunan (*degradation*) atau peningkatan (*aggradation*), baik secara keseluruhan maupun hanya sebagian dari *pool*/bahan organik tanah (Wander *et al.* 1994).

Dalam suatu ekosistem, siklus karbon dapat dikonseptualisasikan dari tiga kompartemen sistem yaitu tanah, tanaman dan atmosfer/udara (Jansen 2004). Iklim, geologi dan praktek pengelolaan lahan merupakan faktor utama yang menentukan kandungan karbon dalam tanah dan tanaman (Yoo *et al.* 2006). Vegetasi atau tanaman secara langsung mempengaruhi konsentrasi CO_2 di atmosfer, panas dan kelembaban tanah dan udara serta menekan erosi tanah (Krinner *et al.* 2005). Distribusi dan kepadatan penutupan lahan oleh tanaman sangat menentukan kandungan C di lahan hutan, sementara pada lahan yang diolah secara intensif seperti lahan usaha tani tanaman pangan, hortikultura, padang penggembalaan, dan lahan alang-alang, kontribusi vegetasi tidak sebesar di lahan hutan.

Karbon dalam tanah disekuestrasi dari atmosfer atau udara dalam bentuk organik melalui deposisi tanaman dan akumulasi bahan organik *recalcitrant* dan bersumber dari bahan induk tanah dalam bentuk bikarbonat dari pelapukan mineral silikat (Chadwick *et al.* 1994). Proses dekomposisi dan sekuestrasi bahan organik dalam tanah merupakan sumber utama input atau penambahan karbon dalam tanah. Temperatur, sisa tanaman atau biomas, dan hara akan sangat menentukan proses dekomposisi biologi dan mineralisasi menjadi *dissolved organic carbon* (DOC), CO_2 dan CH_4 (Banco-Cangui dan Lal 2004). Vegetasi juga berkontribusi terhadap peningkatan karbon tanah melalui eksudat akar, namun dalam waktu bersamaan juga menurunkan kandungan karbon melalui respirasi akar tanaman. Curah hujan berkontribusi terhadap karbon tanah dalam bentuk DOC dan *dissolved inorganic carbon* (DIC). Willey *et al.* (2000) mengemukakan bahwa konsentrasi karbon dari presipitasi di daerah beriklim sedang (*temperate*)

sebesar 0,82-2,00 mg/CL. Deposisi tanah yang terangkut dari tempat lain, merupakan proses relokasi karbon dari satu tempat ke tempat lain dan besarnya sangat tergantung pada proses erosi, translokasi, dan akumulasi di suatu tempat (Quinton *et al.* 2006).

Pada lahan pertanian, kehilangan karbon terjadi melalui peningkatan proses dekomposisi bahan organik pada lapisan olah akibat pengolahan tanah dan hilang terangkut erosi. Proses dekomposisi bahan organik menghasilkan CO_2 melalui respirasi mikroorganisme. Bellamy *et al.* (2005) menyimpulkan bahwa intensitas pemanfaatan lahan pertanian dan perubahan pengelolaan lahan merupakan dua faktor yang paling bertanggung jawab terhadap hilangnya karbon tanah di lahan pertanian Inggris. Selain itu, sebagian karbon tanah juga hilang dari lapisan olah melalui infiltrasi dan perkolasi ke lapisan lebih dalam atau ke air bawah tanah. Keterkaitan karbon tanah dengan sistem drainase dianggap bersifat temporal dan sangat peka terhadap gangguan yang terjadi di dalam badan tanah (Billett *et al.* 2006). Kehilangan karbon tanah melalui aliran bawah tanah sangat tergantung pada jenis tanah dan hanya terjadi dalam suatu kawasan daerah aliran sungai atau *catchment* tertentu.



Gambar 1. Aliran karbon *budget* dalam suatu ekosistem (Billett *et al.* 1994 dalam Dawson dan Smitt 2007)

Teknologi Peningkatan Cadangan Karbon Tanah Mineral

Teknologi Konservasi Tanah Vegetatif

Salah satu teknologi yang mampu meningkatkan cadangan karbon tanah adalah teknik konservasi vegetatif, meskipun sesungguhnya fungsi utama dari teknologi tersebut adalah untuk mencegah terjadi erosi khususnya di lahan kering berlereng (kemiringan tanah >8%). Teknologi konservasi vegetatif meliputi strip rumput, pertanaman lorong (*alley cropping*), dan aplikasi mulsa. Pangkasan rumput dan hijauan legum bila dikembalikan ke dalam tanah (bukan untuk pakan ternak) akan menjadi sumber karbon setelah melalui proses dekomposisi biologi. Sistem pertanaman lorong telah terbukti mampu meningkatkan C-organik tanah (Agus 1993; Montagnini dan Nair 2004; Nurida 2006). Sistem pertanaman lorong dengan menggunakan *Flemingia congesta* sebagai tanaman pagar mampu menghasilkan pangkasan biomas 6-7 t/ha per 6 bulan (Santoso *et al.* 2004), 12,84-16,57 t/ha/th (Nurida 2006).

Hasil penelitian Abujamin *et al.* (1983) di Kebun Percobaan Darmaga Bogor selama satu musim tanam membuktikan bahwa penanaman strip rumput bahia mampu menghasilkan kadar C-organik tanah sebesar 2,29%, sedangkan bila tanah dibiarkan terbuka C-organik tanah hanya 1,67%. Kadar C-organik tanah yang diberi hasil pangkasan strip rumput *Setaria sp.* pada Typic Kandudult sekitar 1,71% lebih tinggi jika dibandingkan tanpa diberi hijauan, yaitu sekitar 1,60%. Penelitian di lahan kering masam Kuamang Kuning, Jambi membuktikan bahwa sistem pertanaman lorong dengan berbagai tanaman pagar legum seperti *Leucaena leucocephala*, *Flemingia congesta* dan *Calliandra calothyrsus* mampu meningkatkan kadar C-organik sebesar 1,31-1,54% bila dibandingkan dengan kadar C-organik tanpa pertanaman lorong hanya sebesar 1,31%. Erfandi *et al.* (1988) mendapatkan bahwa tanaman pagar *Flemingia congesta* mampu meningkatkan C-organik lebih tinggi dibandingkan kaliandra dan lamtoro (Tabel 1)

Tabel 1. Peningkatan kadar C-organik tanah pada berbagai teknik konservasi vegetatif

Teknologi	C-organik tanah (%)	Lokasi	Sumber
Tanah terbuka	1,67	KP IPS Darmaga	Abujamin <i>et al.</i> (1983)
Strip Bahia- <i>Paspalum notatum</i>	2,29	Satu musim tanam	
Tanpa strip rumput	1,60	Typic Kandudult	Nursyamsi <i>et al.</i> (1995)
<i>Setaria sp.</i> 5 t/ha	1,71		
Tanpa <i>alley cropping</i>	1,31	Kuamang	Erfandi <i>et al.</i> (1988)
<i>Alley cropping- Leucaena leucocephala</i>	2,63	Kuning, Jambi	
<i>Alley cropping- Flemingia congesta</i>	2,85		
<i>Alley cropping- Calliandra calothyrsus</i>	2,73		
Tanpa mulsa	2,40	Desa Jasinga, Bogor	Undang Kurnia <i>et al.</i> (1997)
Pemberian mulsa jerami 5 t/ha	2,69	Typic Haplohumults	
Pemberian mulsa mukuna	2,54		
Tanpa mulsa	1,36	Kameo, Batanghari, Jambi	Tala'uhu <i>et al.</i> (2000)
Mulsa jerami padi 5 t/ha	1,52	Typic Kandudults	
Mulsa mukuna 5 t/ha	1,60		



Gambar 2. Strip rumput raja di Desa Deboia, Kupang dan sistem *alley cropping Flemingia congesta* di Kebun Percobaan Taman Bogo, Lampung (Foto: Nurida)

Aplikasi mulsa pangkasan legum, rumput, sisa panen dan bahan organik lainnya baik disebar di permukaan tanah maupun secara vertikal (slot mulsa) mampu meningkatkan kandungan C-organik tanah sekaligus menekan erosi. Pemberian mulsa jerami padi 5 t/ha mampu memberikan C-organik tanah lebih

tinggi (2,54 %) dibandingkan tanpa mulsa (2,40%) pada Typic Haplohumut Desa Jasinga, sedangkan pada Typic Kanhapludult Desa Karmeo, C-organik tanah mencapai 1,52% lebih tinggi dibandingkan tanpa mulsa yang hanya mencapai 1,36% (Tabel 1). Selain jerami padi, hasil panen mukuna (*Leukuna Mucunae*) juga dapat diaplikasikan sebagai mulsa dengan dosis tertentu atau sesuai berat hasil panen. Hasil penelitian Nurida (2006) menginformasikan bahwa hasil panen hijauan mukuna di Typic Kanhapludults sekitar 1,8-4,99 t/ha / musim tanam. Mulsa mukuna juga mampu mensuplai C-organik karena kandungan C-organik hijauan mukuna cukup tinggi, yaitu sekitar 44,99% (Nurida 2006). Kemampuan mulsa bahan organik dalam meningkatkan C-organik tanah sangat tergantung pada dosis dan cara pemberiannya (Nurida 2008). Hasil penelitian Nurida (2006) di Ultisol Jasinga menunjukkan bahwa pemberian pangkasan flemingia sebanyak 4,0 t/ha dengan cara dicampur dan disebar menghasilkan C-organik masing-masing 2,36% dan 2,55%, sedangkan pemberian bahan organik setara 2% dengan cara dicampur dan disebar menghasilkan C-organik tanah masing-masing 3,19% dan 4,19%.

Pemberian Amelioran/Pembenah

Salah satu bahan organik yang mampu meningkatkan cadangan karbon dalam tanah adalah pemberian pembenah tanah atau amelioran. Bahan baku pembenah tanah sangat bervariasi, seperti limbah pertanian meliputi sisa panen, kotoran ternak. (Abdurachman *et al.* 2000; Nurida 2006; Hafif *et al.* 1993) dan non pertanian seperti zeolit, sampah organik kota, limbah industri makanan, limbah industri agrokimia, dll (Prihatini *et al.* 1987; Sastiono dan Wiradinata 1989; Sutono dan Agus 1998). Bahan organik yang bersumber dari pangkasan tanaman dan sisa tanaman sangat terbatas sehingga untuk meningkatkan kandungan bahan organik tanah perlu menambah bahan baku lainnya. Formulasi pembenah tanah baik yang bersifat organik maupun campuran organik dan mineral telah banyak dilakukan guna meningkatkan kualitas pembenah tanah. Formula pembenah tanah organik dan mineral seperti Beta (Dariah *et al.* 2010), formula diperkaya humat (Nurida dan Dariah 2011) dan formula berbahan baku *biochar* (Nurida *et al.* 2008).

Penggunaan kotoran ternak atau pupuk kandang memerlukan dosis yang cukup tinggi untuk mampu meningkatkan C-organik tanah. Undang Kurnia *et al.* (1997) memberikan pupuk kandang sebesar 20 t/ha mampu meningkatkan C-organik tanah sebesar 0,22% selama 21 bulan. Pemberian pupuk kandang 10 t/ha pada Typic Kandudults mampu memberikan kandungan C-organik sebesar 1,8% yang masih lebih tinggi dibandingkan tanpa pupuk kandang hanya 1,60%. Bila pupuk kandang dicampur dengan arang/*biochar* maka dosis yang diberikan lebih rendah, yaitu hanya 2,5 t/ha namun mampu meningkatkan kandungan C-organik sebesar 0,22% / musim (Tabel 2). Teknologi ameliorasi dengan pupuk kandang masih merupakan teknologi yang paling rasional untuk dilakukan, di samping mudah tersedia, juga aplikasinya tidak rumit. Peningkatan kualitas pupuk kandang dapat dilakukan dengan perbaikan teknologi pengomposan sehingga diperoleh amelioran yang berkualitas (Suriadikarta *et al.* 2005).

Tabel 2. Peningkatan kadar C-organik tanah dengan pemberian amelioran

Teknologi	C-organik tanah (%)	Lokasi	Sumber
Tanpa amelioran	2,40	Desa Jasinga, Bogor	Undang Kurnia <i>et al.</i> (1997)
Pemberian pupuk kandang 20 t/ha	2,62	Typic Haplohumults	
Tanpa	1,60	Typic Kandudults	Nursyamsi <i>et al.</i> (1995)
Pupuk kandang 10 t/ha	1,84		
Tanpa	1,73	Desa Jeringo	Nurida dan Dariah (2012)
Mulsa pupuk kandang 2,5 t/ha	1,95		

Bila terjadi hujan, tanah lapisan atas akan kehilangan bahan organik dan unsur hara yang cukup besar terangkut bersama-sama dengan tanah tererosi. Sebagai pembenah di lahan kering menunjukkan bahwa jumlah C-organik yang terangkut dari permukaan cukup besar seperti pada Ultisol Darmaga sebesar 1000 kg/ha (Sinukaban 1990), Citayam 5974 kg/ha (Suwardjo 1981), Jasinga 1741 kg/ha dan Pangalengan 3120 kg/ha (Undang kurnia *et al.* 1997). Kehilangan C-organik tanah melalui erosi perlu diimbangi dengan penambahan bahan organik dari berbagai sumber, penerapan teknik olah tanah dan aplikasi teknologi konservasi agar kualitas tanah dapat terjaga dan lahan dapat dimanfaatkan dalam jangka panjang secara optimal.

Penerapan teknologi konservasi dan aplikasi pembenah tanah mampu meningkatkan kadar C-organik tanah dan sekaligus mengurangi kehilangan C-

organik yang terangkut erosi. Erosi yang terjadi akan mengangkut C-organik dan unsur hara, sehingga akan membuat tanah menjadi miskin. Kehilangan bahan organik karena terangkut sedimen telah banyak dibuktikan, seperti yang dikemukakan Sinukaban (1990), dimana aplikasi mulsa dengan beberapa persentasi, variasi penutupannya terbukti mampu menekan kehilangan C-organik terangkut erosi (Tabel 3). Jumlah C-organik yang hilang jika tanpa aplikasi mulsa mencapai 9898,3 kg/ha tetapi dengan aplikasi mulsa berkurang hingga mencapai 1573,6-8428 kg/ha.

Tabel 3. Besarnya C-organik yang terkandung dalam sedimen dan terangkut erosi pada teknik aplikasi mulsa di Kebun Percobaan Darmaga, Bogor

Penutupan Mulsa (%)	Sedimen (g/l)	C-organik dalam sedimen (%)	C dalam erosi selama 2 MT (kg/ha)
0	8,7	10,3	9898,3
30	6,6	14,0	8428,0
60	4,7	23,9	9751,2
90	2,4	29,6	1573,6

Sumber: Sinukaban (1990)

Tabel 4. Besarnya C-organik yang terangkut erosi pada teknik pemberian pupuk kandang dan mulsa pada Typic Haplohumults Jasinga, Bogor

Teknologi	(kg/ha/21 bulan)	
	Carbon	Nitrogen
Tanpa pupuk kandang dan mulsa	5973,6	1065,8
Pemberian pupuk kandang 20 t/ha	1057,5	292,2
Pemberian mulsa jerami 5 t/ha	158,1	38,4
Pemberian mulsa mukuna	1014,6	196,5

Sumber: Undang Kumia et al. (1997)

Pemberian pupuk kandang dan aplikasi mulsa jerami dan mukuna tidak hanya mampu meningkatkan kandungan C-organik tanah (Tabel 2), tapi juga mampu mencegah kehilangan C-organik yang terangkut aliran permukaan. Pengamatan selama 21 bulan di Typic Haplohumults Jasinga menunjukkan bahwa pemberian pupuk kandang dan mulsa mampu mengurangi kehilangan C-organik sekitar 82,3-97,4 % (Tabel 4).

Pemberian Pembenh Tanah

Permasalahan aplikasi pembenh tanah yang berasal dari sisa tanaman dan pupuk kandang adalah tingginya tingkat dekomposisi, sehingga pembenh tanah tersebut mudah hilang dari tanah, sehingga dibutuhkan jumlah dan frekuensi pemberian yang tinggi. Ketersediaan pembenh tanah dengan kualitas baik dan efektif memperbaiki produktivitas tanah sangat dibutuhkan untuk mengejar laju degradasi tanah yang terus meningkat. Efektivitas pembenh tanah masih terus ditingkatkan dengan berbagai upaya agar dapat dimanfaatkan secara optimal dengan dosis yang rasional. Salah satunya adalah dengan membuat formula pembenh tanah dari berbagai bahan baku yang mudah didapatkan atau melalui proses pengkayaan.

Tabel 5 menunjukkan bahwa berbagai formula pembenh tanah mampu meningkatkan kandungan C-organik tanah dengan dosis yang lebih rendah yaitu <2 t/ha. Hasil penelitian pada Typic Kanhapludult di KP Taman Bogo, Lampung Timur menunjukkan bahwa pengkayaan dengan humat pada pembenh tanah *Zoalit*, Beta dan *Biochar* SP50 dengan dosis 1,5 t/ha mampu meningkatkan kandungan C-organik tanah dalam satu musim tanam. Pemanfaatan limbah pertanian yang dikonversi menjadi arang/*biochar* melalui proses pirolisis sangat potensial untuk meningkatkan cadangan karbon dalam tanah. Pembuatan *biochar* dapat dilakukan dengan menggunakan drum (*mobile*) atau *kiln* permanen (Gambar 3). *Biochar* dapat diberikan 7,5 t/ha untuk 3 musim tanam. Pemberian bisa dilakukan sekaligus, bertahap 2 kali atau 3 kali tergantung ketersediaan bahan baku. Aplikasi *biochar* dapat dilakukan dengan cara disebar, diberikan dalam larikan atau dalam lubang tanam (Gambar 4).

Tabel 5. Peningkatan kadar C-organik tanah dengan pemberian pembenh tanah pada Typic Kanhapludults di Taman Bogo, Lampung

Pembenh tanah	C-organik (%)	Sumber
<i>Zoalit</i> 1,5 t/ha	1,41	Nurida dan Dariah (2011)
<i>Zoalit</i> 1,5 t/ha	1,45	
Beta 1,5 t/ha	1,39	
Beta humat 1,5 t/ha	1,44	
<i>Biochar</i> SP50 1,5 t/ha	1,37	
<i>Biochar</i> SP50 humat 1,5 t/ha	1,43	Nurida et al. (2012)
1,5 t/ha <i>Biochar</i>	0,97	
<i>Biochar</i> SP50 2,5 t/ha	1,07	
<i>Biochar</i> SP50 5 t/ha	1,05	
<i>Biochar</i> SP50 7,5 t/ha	1,01	



Gambar 3. Alat pembuat *biochar* (pirolisator) *mobile* dan permanen di Kebun Percobaan Taman Bogo, Lampung (Foto: Nurida)



Gambar 4. Cara aplikasi *biochar* di lapangan dengan cara disebar (a); di larikan (b); dan dalam lubang tanam (c) (Foto: Nurida)

Teknologi Pengolahan Tanah Konservasi

Pengolahan tanah ditujukan untuk mengontrol struktur tanah pada saat persemaian dan mencampurkan residu tanaman dan gulma ke dalam tanah serta memudahkan kontak antara fraksi bahan organik dengan matrik tanah (Balesdent *et al.* 2000). Perbedaan pengolahan tanah akan mempunyai pengaruh yang spesifik terhadap kadar dan *turn over* bahan organik tanah karena adanya perbedaan produksi bahan kering yang dihasilkan dan penempatan residu tanaman pada masing-masing pengolahan tanah (Angers *et al.* 1995).

Rendahnya pengembalian bahan organik pada tanah yang diolah (dibandingkan tanah yang tidak diolah seperti hutan dan padang penggembalaan) disebabkan rendahnya produksi bahan kering akar pada tanah yang diolah dan besarnya bahan yang diangkut saat panen. Umumnya kadar bahan organik tanah menurun ketika tanah diolah pertama kali (Stevenson 1982). Upaya pengurangan intensitas pengolahan tanah dan adanya penutupan lapisan atas dengan sisa tanaman akan menghambat hilangnya bahan organik tanah (Havlin *et al.* 1990).

Menurut Dao (1998) pengolahan tanah akan mengekspose bahan organik di *near* inter dan intra agregat dan mendorong dekomposisi dan emisi CO_2 dan lain-lain oleh biomassa mikroorganisme dalam jangka pendek. Selain itu, semakin banyak aerasi tanah dan kondisi fisik tanah sesaat setelah diolah dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme untuk mendekomposisi bahan organik tanah karena lebih tersedianya O_2 (Jastrow *et al.* 1996) dan memineralisasi bahan organik fraksi labil (Angers *et al.* 1992), fraksi yang tidak terlindungi secara fisik (Balesdent *et al.* 2000), khususnya biomassa fungi yang mengikat mikroagregat menjadi makroagregat (Cambardella dan Elliot 1992). Angers *et al.* (1992) menyatakan bahwa penurunan kadar bahan organik tanah melalui pengolahan tanah dapat terjadi melalui mekanisme: 1) terjadi pencampuran antara horizon atas yang kaya bahan organik dengan lapisan bawah yang relatif miskin bahan organik; 2) percepatan mineralisasi karena intensitas pengolahan meningkat; 3) erosi; dan 4) rendahnya input C.

Yeo *et al.* (2007) mendapatkan efektivitas penerapan olah tanah konservasi, yaitu tanpa olah tanah dalam mengsequester karbon di daratan. Olah tanah konservasi tanpa olah tanah disertai dengan pengembalian sisa tanaman ke dalam tanah meningkatkan sequestrasi karbon lebih optimal. Aplikasi di lahan Uluwatu memperlihatkan bahwa bila hanya mengembalikan sisa tanaman ke dalam tanah tanpa olah tanah (TOT), maka rata-rata sequestrasi karbon adalah hanya 23,3-57,1 Tg C/ha, sedangkan bila hanya menerapkan TOT, maka sequestrasi karbon berkisar 21,5-43,0 Tg C/ha. Bila seluruh sisa

tanaman dikembalikan ke dalam tanah dan diterapkan TOT, maka rata-rata sekuestrasi karbon akan meningkat menjadi 71,7 Tg C/ta (Tabel 6). Cansercas *et al.* (2013) mendapatkan besarnya sekuestrasi karbon per tahun sebesar 23-26,3 Mg/ha pada pengolahan tanah konvensional, sedangkan dengan tanpa olah tanah sebesar 25,5-29,1 Mg/ha pada lempung liat berpasir di Brazil.

Tabel 6. Sekuestrasi karbon potensial pada aplikasi tanpa olah tanah (TOT) dan penambahan sisa tanaman (PST) di China, 2007

Pengelolaan lahan	Sekuestrasi karbon potensial (Tg C)	Durasi (th)	Rata-rata sekuestrasi karbon (Tg C/ta)	Penghematan karbon fossil fuel/pertanian (Tg C/ta)	Total potensi mitigasi karbon (Tg C/ta)
50% PST	231,8	10	23,2	-	23,2
100% PST	1146,2	20	57,1	-	57,1
50% TOT	1247,3	58	21,5	1,9	23,2
100% TOT	2497,2	58	43,0	3,8	46,8
50% TOT + 50% PST	2372,0	73	32,5	1,9	34,4
100% TOT + 100% PST	6024,0	84	71,7	3,8	75,5

Sumber: Yan *et al.* (2007)

Biomassa Hasil Pertanian

Sistem pertanian lahan kering menghasilkan biomassa hasil tanaman pangan berupa jerami padi gogo, brangkasan jagung, kedele, kacang tanah, ubi kayu, dan ubi jalar. Biomassa tanaman sangat potensial untuk meningkatkan kandungan C-organik tanah bila dikembalikan ke dalam tanah. Aplikasi konsep zero waste sangat mendukung peningkatan bahan organik tanah. Seluruh sisa tanaman (biomassa) dikembalikan ke dalam tanah baik disebar di permukaan tanah maupun diinkorporasikan/dicampurkan saat pengolahan tanah. Kontribusi pengembalian biomassa terhadap cadangan karbon tanah sangat tergantung pada jumlah dan cara pemberian.

Biomassa tanaman yang dikembalikan ke dalam tanah akan menjadi sumber energi bagi mikroba untuk tumbuh dan beraktivitas (Anas *et al.* 1997). Biomassa mikroorganisme berkaitan erat dengan kadar bahan organik tanah sehingga sangat dipengaruhi oleh penambahan bahan organik seperti sisa tanaman dan pupuk kandang (Franzlubbers dan Arshad 1997). Peningkatan jumlah dan aktivitas mikroorganisme ditunjukkan oleh meningkatnya biomassa mikroorganisme (C_{mik}), dan meningkatnya evolusi CO_2 (Joergensen 1996).

Chantigny *et al.* 1997). Cadangan karbon yang tersimpan dalam tanah merupakan resultante dari kehilangan melalui dekomposisi menjadi CO_2 dan yang berinteraksi dengan tanah menjadi mikroagregat. Bahan organik yang terdapat pada agregat mikro sangat terlindungi dari degradasi oleh mikroba (Golchin *et al.* 1994).

Tabel 7. Biomassa kering beberapa komoditas tanaman pangan pada beberapa perlakuan sebagai sumber karbon tanah

Teknologi	Jerami padi gogo	Jagung	Kedele	Kacang tanah	Ubi kayu	Sumber
			t/ha			
Pendupaan mulsa 60%				2,06		Sinukaban (1990)
Pemberian biochar	2,59		1,2			BBSOLP (2013a; 2013b)
Akri cropping	4,7	5,20				Balitanah (2013)
Rotasi tani 1,5 t/ha		3,84				Nurda dan Dariah (2011)
Biochar SP50Humat 1,5 t/ha		3,87				Nurda dan Dariah (2011)
Pemberian Formula Biochar 5 t/ha		4,04				Nurda <i>et al.</i> (2012)
Tanpa olah tanah		3,20	1,2	1,86		Nurda (2006)
Pupuk kandang/pupuk organik	2,95		2,2		4,6	BBSOLP (2013); Balitanah (2013)
Rata-rata	3,41	4,03	1,5	1,96	4,6	

Balok Karbon Pada Pertanian Lahan Kering

Salah satu upaya peningkatan cadangan karbon dalam tanah yang dapat dilakukan adalah penggunaan bahan-bahan yang tersedia di lokasi setempat atau bersifat *in situ*. Sumber bahan organik yang potensial dapat dikelompokkan berdasarkan sumber bahan baku tersebut, yaitu sisa tanaman (jerami, brangkasan, tandan kosong sawit, kulit buah kakao, dan tempurung kelapa), sisa hasil pertanian (sekam padi, kulit kacang tanah, ampas tebu, dan blotong), limbah ternak (sapi, kambing, kuda, ayam, dan babi), dan sampah kota. Sumber bahan organik tersebut sebagian dapat diaplikasikan langsung tanpa

melalui proses pengomposan seperti hijauan legume (azola, flemingia, sesbania, dan mukuna) dan limbah jamur.

Kandungan karbon (C) di dalam berbagai sumber bahan organik tersebut sangat bervariasi. Sumber bahan organik yang mudah terdekomposisi dicirikan oleh rasio C/N rendah (20-35) dapat dimanfaatkan langsung atau melalui proses pengomposan. Bahan yang sulit terdekomposisi dan mempunyai nilai C/N rasio >40% dapat dimanfaatkan menjadi arang (*biochar*) melalui proses pirolisis (pembakaran tidak sempurna) pada temperatur 250-500^o C, sehingga akan diperoleh *biochar* yang kaya karbon dan mampu bertahan lama dalam tanah.

Bahan organik yang tertera pada Tabel 8 merupakan bahan organik yang dapat langsung dimanfaatkan dan sebagian masih perlu dikomposkan terlebih dahulu sebelum diaplikasikan ke dalam tanah. Kandungan karbon dari sumber bahan organik tersebut berkisar 37-56% (sisa tanaman dan sisa hasil pertanian) dan 53,6-69,9% (kotoran ternak matang). Bahan baku kompos tersebut sangat potensial untuk meningkatkan kandungan C-organik dalam tanah. Pemilihan sumber bahan organik yang akan digunakan sangat tergantung pada ketersediaannya, kemudahan aplikasi, dan efektivitas penggunaannya.

Tabel 8. Kandungan karbon dalam berbagai sumber bahan organik

Sumber	C (%)	Sumber	C (%)
Jerami padi	54-56	Kotoran Mentah	
Kulit padi	50-55	• Sapi	16,7
Batang jagung	55	• Kambing	30,7
Batang kedele	51	• Unggas	30,7
Batang kacang tanah	42	• Kuda	7,0
Kulit kacang	49	Kotoran matang	
Batang pisang	6,22	• Sapi	69,9
Tithonia	37,94	• Kambing	53,9
Kinnyu	43,32	• Unggas	58,6
Azola	37,89		
Mukuna	46,90		
Flemingia	48,08		

Sumber: Badan Penelitian Pengembangan Pertanian (2009)

Sumber bahan organik lain yang dapat dimanfaatkan adalah sisa media jamur dan sampah kota (Tabel 9). Media jamur berupa abu gergaji, dedak/bekatul, jerami dan kapur setelah ditanami jamur, maka limbahnya dapat

dimanfaatkan sebagai bahan organik yang mampu mensuplai karbon. Sebagai sumber karbon, media jamur cukup potensial, namun sebagai sumber hara perlu dicampur dengan bahan lain seperti pupuk kandang. Pemanfaatan sampah kota berupa sampah domestik dan sampah industri sebagai sumber karbon perlu penanganan khusus sebelum dimanfaatkan mengingat sebagian bahan tersebut ditengarai banyak terkontaminasi B3 (bahan beracun berbahaya) dan bercampur dengan plastik. Sumber bahan organik lainnya yang potensial adalah sampah organik berupa sisa sayuran, sisa makanan yang banyak mengandung karbon, bila karbon tersebut diekstrak maka akan diperoleh sumber karbon yang berkualitas.

Tabel 9. Kandungan C-organik dalam berbagai sumber bahan organik

Sumber ¹⁾	C/N	C-organik (%)	Sumber ²⁾	C/N	C-organik (%)
jamur putih	44	39	Tempurung kelapa	122	24,33
jamur shiitate	27-42	37-57	Kulit buah kakao	20	37,50
jamur kuping	75	56	Tempurung sawit	34	37,53
limbah abu gergaji	57	40	Sekam padi	49	35,98
sampah kota:			Tongkol jagung	-	23,00
• Yogyakarta	32,52	12,36			
• Medan	62	6,83			
• Ungeran	34,63	38,1			

Sumber: ¹⁾ Badan Penelitian Pengembangan Pertanian (2009); ²⁾ Nuride *et al.* (2008)

Potensi bahan baku *biochar* arang seperti tempurung kelapa, tempurung kelapa sawit, kulit buah kakao, sekam padi, dan tongkol jagung cukup melimpah dan banyak dimanfaatkan secara optimal sebagai sumber karbon. Bahan-bahan tersebut sangat sulit didekomposisi tetapi setelah melalui proses antara lain pemanasan sehingga terbentuk arang (*biochar*) dapat diaplikasikan ke dalam tanah. Salah satu keunggulan aplikasi dalam bentuk *biochar* adalah mengurangi emisi CO₂ dan mampu mengakumulasi karbon dalam jumlah yang cukup lama (Munier *et al.* 2006).

Potensi Cadangan Karbon Tanah di Lahan Kering

Luas lahan kering potensial yang dapat dimanfaatkan secara optimal untuk budidaya pertanian sekitar 79,1 juta ha, dan perkiraan luas yang digunakan untuk memproduksi bahan pangan hanya sekitar 5,3 juta (Mulyani dan Hidayat 2010). Tanpa luas panen ubijalar dan sayuran, luas perkiraan panen tanaman pangan sekitar 4,8 juta ha, setiap komoditas yang ditanam menghasilkan berat biomassa yang cukup besar seperti tertera pada Tabel 10. Bila diasumsikan seluruh komoditas berhasil panen, maka secara nasional akan diperoleh jumlah potensi biomassa kering dari tanaman pangan utama sekitar 18,4 juta t/th (Tabel 11). Jumlah tersebut dapat dimanfaatkan sebagai sumber karbon setelah melalui proses pengomposan atau diaplikasikan langsung.

Tabel 10. Luas panen dan potensi biomassa tanaman pangan rata-rata selama 5 tahun (2004-2008)

Komoditas	Luas panen (ha)	Perkiraan porsi luas panen dari LK (%)	Perkiraan luas panen LK (ha)	Produktivitas biomassa kering potensial (t/ha) ¹	Jumlah biomassa kering potensial (t/th) ²
1	2	3	4	5	6
Padi gogo	1.095.741	100	1.095.741	3,41	3.736.477
Jagung	3.553.608	60	2.133.696	4,03	8.598.795
Kedelai	555.152	30	166.716	1,5	250.074
Kacang tanah	690.974	70	474.760	1,96	93.053
Kacang hijau	304.729	50	152.365	1,1	167.602
Ubikayu	1.213.287	100	1.213.287	4,6	5.581.120
Jumlah	7.413.491		4.809.281		18.427.120

Sumber: Mulyani dan Hidayat (2010); ¹data dari Tabel 7; ²Hasil perkalian kolom 4 dengan kolom 5

Tabel 11 memperlihatkan bahwa potensi karbon dari biomassa hasil pertanian tanaman pangan relatif kecil yaitu hanya 5,5 juta t/th dengan asumsi proporsi yang dapat dikembalikan ke dalam tanah sebagai mulsa atau dikomposkan seperti tertera pada kolom 3. Bila sebelum dimanfaatkan, biomassa tersebut dikomposkan secara aerob terlebih dahulu maka sekitar dua pertiga atau sekitar 60% dari C menguap menjadi CO₂ (Setyorini et al. 2006) sehingga jumlah yang bereaksi dengan tanah menjadi sangat terbatas. Dengan demikian,

potensi biomassa yang dapat meningkatkan cadangan karbon dalam tanah yang bersumber dari biomassa tanaman pangan hanya 2,16 juta t/th.

Tabel 11. Potensi karbon dari biomassa hasil pertanian tanaman pangan lahan kering secara nasional

Biomassa pertanian	Jumlah (t/th)	Asumsi biomassa yang dapat dikembalikan ke dalam tanah (%)	Biomassa yang dapat menjadi sumber C (t/th)	Rasio karbon/ biomassa	Jumlah potensi C (t/th)
1	2	3	4	5	6
Padi gogo	3.736.477	70	2.615.534	0,56	1.464.699
Jagung	8.598.795	80	6.879.036	0,55	3.783.470
Kedelai	250.074	100	250.074	0,51	127.538
Kacang tanah	93.053	100	93.053	0,42	39.082
Kacang hijau	167.602	100	167.602	0,46	77.097
Ubikayu	5.581.120	50	2.790.560	0,36	1.004.602
Jumlah	18.427.120		12.795.858		6.496.487

Keterangan: Kolom 2: data dari Tabel 10 kolom 6; Kolom 4: perkalian kolom 2 dan kolom 3; Kolom 6: perkalian kolom 4, dan kolom 5.

Biomassa yang dapat menjadi cadangan karbon bersumber dari biomassa tanaman pangan dan perkebunan yang dikonversi menjadi arang. Tabel 12 memperlihatkan perkiraan jumlah biomassa pertanian yang dapat dijadikan biochar. Asumsi jumlah biomassa yang dapat dikonversi seperti pada Tabel 3, maka sekitar 3,1 juta t/th biochar diharapkan tersedia sebagai bahan tambahan untuk meningkatkan cadangan karbon tanah. Potensi total jumlah biomassa yang dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan cadangan karbon dari lahan kering sekitar 5,26 juta t/th.

Table 12. Perkiraan jumlah limbah pertanian dan potensinya dikonversi menjadi *biochar*

Biomassa pertanian	Jumlah ¹⁾ (t/th)	Asumsi biomassa yang dapat dikonversi (%)	Jumlah biomassa yang dapat dikonversi menjadi <i>Biochar</i> (t/th)	Rasio <i>Biochar</i> biomassa ²⁾	Jumlah potensi <i>biochar</i> (t/th)
1	2	3	4	5	6
Sekam padi	13.612.343	50	6.806.172	0,26	1.769.605
Tempurung kelapa	539.644	50	269.822	0,25	67.456
Tempurung kelapa sawit	6.400.000	30	1.920.000	0,5	960.000
Kulit buah kakaol	1.208.553	50	604.277	0,33	199.411
Tongkol jagung	3.652.372	30	1.095.712	0,13	142.443
Total	25.412.912		10.695.982		3.138.914

Sumber: ¹⁾Biro Pusat Statistik (2011); ²⁾Nurida et al. (2008)

Penutup

Potensi lahan kering yang tersedia, diprediksi sekitar 50% dari 122,1 juta ha dapat dimanfaatkan untuk budi daya pertanian baik tanaman pangan maupun perkebunan. Keberlanjutan pengusahaan tanah secara intensif pada lahan kering tersebut, khususnya pada lahan yang telah terdegradasi sangat tergantung pada upaya konservasi bahan organik, agar kualitas tanah dapat terjaga dan keberlanjutan usaha tani dapat terjamin. Peningkatan cadangan karbon di lahan kering sangat tergantung pada penambahan bahan organik secara terus menerus dan terdistribusi secara baik sepanjang tahun, dan mengurangi jumlah yang hilang dari tanah melalui dekomposisi dan erosi.

Upaya penambahan bahan organik dengan penerapan konsep *zero waste*, penerapan olah tanah konservasi baik olah tanah minimum maupun tanpa olah tanah serta konservasi tanah secara vegetatif akan sangat membantu upaya konservasi karbon di lahan kering. Pengembalian sisa tanaman baik melalui mulsa, pengomposan bahan organik maupun dikonversi menjadi *biochar* yang

adalah langkah-langkah yang perlu ditempuh. Upaya lain untuk mempercepat pemulihan lahan sekaligus peningkatan cadangan karbon dapat ditempuh dengan merekayasa bahan baku organik menjadi suatu formula yang berkualitas.

Penerapan teknik konservasi dengan tujuan utamanya adalah mencegah erosi mampu berkontribusi terhadap peningkatan cadangan karbon melalui pengembalian rumput/legum yang selanjutnya berkontribusi menurunkan laju aliran permukaan dan laju erosi juga berkontribusi terhadap pengurangan kehilangan karbon tanah. Secara nasional, peningkatan cadangan karbon di lahan kering belumlah optimal. Hal ini disebabkan oleh ketersediaan bahan organik yang terbatas dan pengelolaan lahan yang dilakukan belum mengacu pada prinsip konservasi tanah dan karbon. Potensi biomas dari lahan kering untuk meningkatkan cadangan karbon tidak terlalu besar, sehingga perlu diintegrasikan dengan sumber lain seperti dari limbah ternak. Diperlukan upaya pengelolaan lahan kering secara terintegrasi dengan ternak sehingga konservasi karbon tanah dapat ditingkatkan dan tanah dapat dimanfaatkan secara optimal.

Daftar Pustaka

- Alakurachman, A., I. Juarsah, dan U. Kurnia. 2000. Pengaruh penggunaan berbagai jenis dan takaran pupuk kandang terhadap produktivitas tanah Ultisols terdegradasi di Desa Batin, Jambi. Hal 303-319 dalam Pros. Seminar Nasional Sumber Daya Tanah, Iklim dan Pupuk. Buku II. Bogor, 6-8 Des. 1999. Puslittanak. Bogor.
- Atjadiningsih, S., A. Admihardja, dan U. Kurnia. 1983. Strip rumput permanen sebagai salah satu cara Konservasi Tanah. Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk 1:16-20.
- Agus, F. 1993. Soil Processes and Crop Production under Contour Hedgerow Systems on Sloping Oxisols. Departement of Soil Science. North Carolina State University, Raleigh.
- Asas, I., D. A. Santosa, dan R. Widyastuti. 1997. Penggunaan ciri mikrobiologi dalam mengevaluasi degradasi tanah. Buku I: 607-615 dalam Subagyo, H., S. Sabiham, R. Shofiyati, A. B. Siswanto, F. Agus, A. Rachman dan S. Ropiq (Eds.). Prosiding Kongres Nasional VI HITI. Bogor.
- Beggs, P. A., A. Pesant, and J. Vigneux. 1992. Early cropping induced changes in soil aggregation, organic matter, and microbial biomass. Soil. Sci. Soc. Am. J. 56: 115-119.

- Angers, D. A., R. P. Voroney, and D. Cote. 1995. Dynamics of soil organic matter and corn residue affected by tillage practices. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 59: 1311-1315.
- Arsyad S. 1989. *Konservasi Tanah dan Air*. Bogor: Penerbit IPB. 290 hal.
- Badan Penelitian Pengembangan Pertanian. 2009. *Tinjauan Akademik Percepatan Pengomposan Bahan Organik*. Departemen Pertanian, Jakarta.
- Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya lahan. 2012. *Lahan Sub Optimal: Potensi, Peluang dan Permasalahan Pemanfaatannya untuk Mendukung Program Ketahanan Pangan*. Disampaikan dalam Seminar Lahan Suboptimal, Palembang, Maret 2012. Kementerian Riset dan Teknologi, Jakarta. (Tidak dipublikasikan).
- Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya lahan. 2012. *Lahan Sub Optimal: Potensi, Peluang, dan Permasalahan Pemanfaatannya untuk Mendukung Program Ketahanan Pangan*. Disampaikan dalam Seminar Lahan Suboptimal, Palembang, Maret 2012. Kementerian Riset dan Teknologi, Jakarta. (Tidak dipublikasikan).
- Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya lahan. 2013a. *Laporan Akhir Konsorsium Penelitian dan Pengembangan Sistem Pertanian Terpadu di Lahan Suboptimal (Lahan Kering Masam dan Lahan Kering Iklim Kering) Berbasis Inovasi Teknologi*. Kementerian Riset dan Teknologi, Jakarta. (Tidak dipublikasikan).
- Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya lahan. 2013b. *Laporan Akhir Kerjasama Penelitian Biochar on Acidic Agricultural Land in Indonesia: Sequestration Carbon and Improving Crop Yield*. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Jakarta. (Tidak dipublikasikan).
- Balai Penelitian Tanah. 2013. *Laporan Kegiatan Penelitian di Kebun percobaan Taman Bogo*. Badan penelitian dan Pengembangan Pertanian. (Tidak dipublikasikan).
- Balesdent, J., C. Chenu, and M. Balabane. 2000. Relationship of Soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Till. Res.* 53: 215-230.
- Bellamy P.H., P.J. Loveländ, R.I Badley, R.M. Lark, and G.J.D. Kirk. 2005. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003. *Nature* 437:245-258.

- Billett M.F., C.M. Deacon, S.M. Palmer, J.J.C. Dawson, and D. Flope. 2006. Connecting organic carbon in streamwater and soils in a peatland catchment. *J. Geophys. Res. Biosci.* 111: 234-245.
- Biro Pusat Statistik. 2011. *Statistik Indonesia*. Badan Pusat Statistik, Jakarta.
- Bianco-cangul H. and R. Lal. 2004. Mechanism of carbon sequestration in aggregates. *Crit. Rev. Plant Sci.* 23(6):481-504.
- Cambardella, C. A. and E. T. Elliott. 1992. Particulate soil organic matter change across a grassland cultivation sequence. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 56: 777-783.
- Caierscao, P. C., J. Dieckow, and C. Bayer. 2013. Combined role of no tillage and cropping systems in soil carbon stock and stabilization. *Soil & Tillage Research.* p 40-47.
- Chadwick, O.A., E.F. Kelly, D.M. Merritts, and R.G. Amundson. 1994. Carbon dioxide consumption during development. *Bio geochemistry* 24:115-127.
- Chantigny M. H, D.A. Angers, D. Prevost, L.P. Vezina, and F. P. Chalifur. 1997. Soil aggregation and fungal and bacterial biomass under annual and perennial cropping systems. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 61: 262-267.
- Collin, H. P., P. E. Rasmussen, and C. L. Douglas Jr. 1992. Crop rotation and residue management effect on soil carbon and microbial dynamics. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 56: 783-788.
- Enzel, R. C. 1998. Soil microbial biomass - what do the number really mean?. *Adv. J. Exp. Agric.* 38: 649 - 665.
- Flan, T.H. 1998. Tillage and crop residue effects on carbon dioxide evolution and carbon storage in Paleustoll. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 62: 250-256.
- Harah, A. Sutono, dan N.L. Nurida. 2010. Penggunaan pembenah tanah organik dan mineral untuk perbaikan kualitas Tipic Kanhapludults. *Jurnal Tanah dan Iklim* 31: 1-9.
- Hansen, J.J.C. and P. Smith. 2007. Carbon losses from soil and its consequences for land use management. *Science of the Total Environment* 382:165-190.
- Iskandar, B., H. Swardjo, dan A. Radhman. 1988. *Penelitian Alley Cropping di Ruwang Kuning*. Laporan Hasil Penelitian Pola Usaha tani Terpadu di Daerah Transmigrasi Kuamang Kuning Jambi. Hal 105-110. Kerjasama Departemen Transmigrasi dengan Pusat Penelitian Tanah. Jakarta. (Tidak dipublikasikan).

- Franzluebbers, A. J. and M. A. Arshad. 1997. Soil microbial biomass and mineralizable carbon of water stable aggregates. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 61: 1090-1097.
- Golchin, A., J.M. Oades, J.O. Skjemstad, and P. Clarke. 1994. Shidy of free and occluded particulate organic matter in Soils by Solid state CP/MAS NMR Spectroscopy and Scanning electron microscopy. *Aust. J. Soil. Res.* 32:285-309.
- Hafif.B., D. Santoso. S. Adiningsih, dan H. Suwardjo. 1993. Evaluasi penggunaan beberapa pengelolaan tanah untuk reklamasi dan konservasi lahan terdegradasi. *Pembrt. Pen. Tanah dan Pupuk* 11: 7-12.
- Havlin, J. L., D. E. Kissel, L. D. Maddux, M. M. Claasen, and J. H. Long. 1990. Crop rotation and tillage effect on soil organic carbon and nitrogen. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 54:448-452.
- Irianto, G., A. Abdurachman, dan I. Juarsah. 1993. Rehabilitasi tanah Tropudults tererosi dengan sistem pertanaman lorong menggunakan tanaman pagar *Flemingia congesta* L. *Pembrt. Pen. Tanah dan Pupuk* 11: 13-18.
- Janzen, H.H. 2004. Carbon cycling in earth systems- a soil science prespective. *Agric. Ecosyst. Environ* 104:399-417.
- Jastrow, J. D., T. W. Boutton, and R. M. Miller. 1996. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 60:801-807.
- Joergensen R.G. 1996. The Fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass calibration of the k_{EC} value. *Soil Biol. Biochem.* 28: 25-31.
- Krinner G., N. Viovy, N. de Noblet-Dacoudre., J. Ogree, J. Polcher, and P. Friedlingstein. 2005. A. Dynamic vegetation model for studies of coupled atmosphere-biosphere system. *Glob biogeochem. Cycles* 19: 110-115.
- Kurnia, U. 1996. Kajian metode rehabilitasi lahan untuk meningkatkan dan melestarikan produktivitas tanah. Disertasi Fakultas Pasca Sarjana, IPB, Bogor.
- Lol, R. 1994. Method and Guidelines for Assessing Sustainable Use for Soil and Water Resources in the Tropics. SMSS Tech. Monograph no. 21. USDA. 78 p

- Lu, G., K. Sakagami, H. Tanaka, and R. Hamada. 1998. Role of organic matter in stabilization of water stable aggregates in soils under different types of land use. *Soil Sci. Plant Nutr.* 44 (2): 147-155.
- Montagnini, F. and Nair, P.K.R. 2004. Carbon sequestration and under exploited environmental benefit of agroforestry system. *Agroforest. Syst.* 01:281-295.
- Mulyani, A., dan A. Hidayat. 2010. Kapasitas produksi bahan pangan di lahan kering. *In* Buku: Analisis Sumberdaya Lahan Menuju Ketahanan Pangan Berkelanjutan. Badan penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Murida, N. L. 2006. Peningkatan Kualitas Ultisol Jasinga Terdegradasi dengan pengolahan Tanah dan Pemberian bahan Organik. Disertasi Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor. 145 hlm.
- Murida, N.L, A. Dariah, dan A. Rachman. 2008. Kualitas limbah pertanian sebagai bahan baku pembenah tanah berupa *biochar* untuk rehabilitasi lahan. *Hid.* 27-37 *dalam* Prosiding Nasional dan Dialog Sumberdaya Lahan Pertanian. Bogor, 18-20 November 2008. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Murida, N.L. dan A. Dariah. 2011. Pengkayaan pembenah tanah dengan senyawa humat untuk meningkatkan kualitas lahan kering masam terdegradasi. *Buku I: 151-160 dalam* Prosiding Nasional Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Banjarbaru, 13-14 Juli 2011.
- Murida, N.L. dan A. Dariah. 2012. Formula pembenah tanah untuk meningkatkan efisiensi pemupukan dan hasil jagung di lahan kering iklim kering Lombok. *Buku I: 76-82 dalam* Prosiding Nasional Peran Teknologi untuk Menuju Kedaulatan Pangan dan Peningkatan Perekonomian Bangsa. Fakultas Pertanian Universitas Veteran, Yogyakarta. Yogyakarta, 13 November 2012.
- Murida, N.L., A. Rachman, dan Sutono. 2012. Potensi pembenah tanah *biochar* dalam pemulihan sifat tanah terdegradasi dan peningkatan hasil jagung pada Typic Kandudult lampung. *Jurnal Penelitian Ilmu-ilmu Kehutanan, Buana Sains* 12 (1): 69-74.
- Sopandi D., D. Sopandi, D. Erfandi, Sholeh, dan I.P.G. Widjaja-Adhi. 1995. Penggunaan bahan organik, Pupuk P dan K untuk meningkatkan produktivitas tanah Podsolik (Typic Kandudults). *Risalah Seminar Hasil Penelitian tanah dan Agroklimat.* Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor.

- Oades, J.M. 1990. Association of colloids in soil aggregates. p 463-483. *In* De Boodt M. F., Hayes M.H.D., and Herbillon A. (Eds.). Soil Colloids and Their Association in Aggregates. Plenum Press, New York.
- Obi, M. E. 1999. The physical and chemical responses of a degraded sandy clay loam soil to cover crop in Southern Nigeria. *Plant Soil* 211: 165 – 172.
- Ogawa, M. 2006. Carbon sequestration by carbonization of biomass and forestation: three case studies. p 133-146.
- Prihatini, T., Mursidi dan A. Hamid. 1987. Pengaruh zeolit terhadap sifat tanah dan tanaman. *Pembrit. Penel. Tanah dan Pupuk* 7: 5-8.
- Purnomo, J., M. Mulyadi, I. Amien, dan H. Suwardjo. 1992. Pengaruh bahan hijauan tanaman kacang-kacangan terhadap produktivitas tanah rusak. *Pembrit. Pen. Tanah dan Pupuk* 10: 61-65.
- Quinton, J.N., J.A. Catt, G.A. Wood, and J. Steer. 2006. Soil carbon losses by water erosion: experimentation and modeling at field and national scale in the UK. *Agric Ecosyst. Environ.* 112:87-102.
- Rachman, A. dan A. Dariah. 2008. Olah tanah konservasi dalam Konservasi lahan kering. Balai Penelitian Tanah. Badan Litbang Pertanian, Departemen Pertanian. Jakarta.
- Rasiah, V., and B.D. Kay. 1999. Temporal dynamics of microbial biomass and mineral N in legume amended soils from spatially variable landscape. *Geoderma*. 92: 239-256.
- Rochayati S. dan A. Dariah. 2012. Perkembangan Lahan Kering masam: Peluang, Tantangan dan Strategi serta Teknologi Pengelolaan. Hal. 187-206 Dariah *et al. dalam* Prospek Pertanian Lahan Kering dalam mendukung Ketahanan Pangan. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Jakarta.
- Santoso D., J. Purnomo, I.G.P Wigena, dan E. Tuherkih. 2004. Teknologi konservasi tanah vegetatif. Hal 77-108 *dalam* Undang Kumia *et al* (Eds.). Teknologi Konservasi Tanah pada Lahan Kering Berlereng Kurnia *et al.* Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Jakarta.
- Sastiono. A. dan O. W. Wiradinata. 1989. Laporan Penelitian Peranan Zeolit dalam Peningkatan Produksi Pertanian. Jurusan Tanah. Fak. Pertanian, IPB. Bogor. (Tidak dipublikasikan)
- Setyorini, D., R. Saraswati, dan E. Kosman. 2006. Kompos dalam Pupuk Organik dan Pupuk Hayati. Hal. 11-40 *dalam* Simanungkalit *et al.* (Eds.). Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Jakarta.

- Sinukaban, N. 1990. Pengaruh pengolahan tanah konservasi dan pemberian mulsa jerami terhadap produksi tanaman pangan dan erosi hara. *Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk* 9 : 32-45.
- Situmorang, R. 1999. Pemanfaatan Bahan Organik Setempat, *Mucuna sp.* dan Fosfat Alam untuk Memperbaiki Sifat-sifat Tanah Palehumults di Miramontanan, Sukabumi. Disertasi Program Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Sombroek, W.G. and F.O. Nacktergaele. 1993. Identification and Management of Problem Soils in Tropics and Subtropics (with emphasis on the Asia Pacific Region). In. Report of the Expert Consultation of the Asian Network on Problem Soils, 25-29 Oct. 1993. Bangkok. Thailand. p. 61-68.
- Staben, M. L., D. F. Bezdicsek, J. L. Smith, and M. F. Faucl. 1997. Assessment of soil quality in conservation reserve program and wheat-fallow soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 61: 124-130.
- Steiner, Christoph, Teixeira, Wenceslau, Lehmann, Johannes, Nehls, Thomas, de Macido, Jefferson, Blum, Winfried, Zech, and Wolfgang. 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil* 291(1): 275-290.
- Stevenson, F.J. 1982. Humus Chemistry, Genesis, Composition, Reaction. 2nd ed. John Wiley and Sons, New York.
- Sulastiono. 1991. Pengaruh tiga cara pengembalian jerami ke dalam tanah Ruzina terhadap: (1) komposisi bahan organik tanah. *J Il. Pert. Indon.* 1: 79-84.
- Sulastyonobowo, Mulyadi, P. Wigena, dan A. Kasno. 1993. Pengaruh penambahan bahan organik, kapur dan pupuk NPK terhadap sifat kimia tanah dan hasil kacang tanah. *Pembrit. Pen. Tanah dan Pupuk* 11: 1-6.
- Sulastikarta D.A., T. Prihatini., D. Setyorini, dan W. Hartatik. 2005. Teknologi pengelolaan bahan organik tanah. Hal. 169-222 *dalam* Teknologi Pengelolaan Lahan Kering. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Badan Litbang Pertanian. Departemen Pertanian. Jakarta.
- Susanto dan F. Agus. 1998. Pengaruh pembenah tanah terhadap hasil kedelai di Cikupet. Sumedang. Hal. 379-386, *dalam* Prosiding Seminar Nasional Sumberdaya Lahan. Garut-Bogor, 9-11 Februari 1999, Puslitbangtanak, Bogor.

- Suwardjo H., and N. L. Nurida. 1993. Land degradation in Indonesia: Data Collection and Analysis. p 121-135. *In*. Report of the Experts Consultation of the Asian Network on Problem Soils. Bangkok, 25 - 29 Oct 1993.
- Suwardjo, H. 1981. Peranan Sisa-sisa Tanaman dalam Konservasi Tanah dan Air pada Usaha tani Tanaman Semusim. Disertasi Fakultas Pasca Sarjana, IPB, Bogor.
- Suwardjo, H. dan N. Sinukaban. 1986. Masalah Erosi dan Kesuburan Tanah di Lahan Kering Podsolik Merah Kuning di Indonesia. Makalah Lokakarya Usaha tani Konservasi di Lahan Alang-Alang Podsolik Merah Kuning di Palembang. 11-13 Pebruari 1986. (Tidak dipublikasikan).
- Suwardjo, H., A. Abdurachman, and S. Abunyan. 1989. The use of crop residue mulch to minimize tillage frequency. *Pembt. Pen. Tanah dan Pupuk* 8:31-37.
- Talao'hu, S.H., I. Juarsah, U. Kurnia, dan H. Kusnadi. 2000. Pengaruh pengolahan tanah terhadap produktivitas Typic Kanhapludults, Jambi. *Prosiding Seminar Nasional Reorientasi Pendayagunaan Sumberdaya Tanah, Iklim dan Pupuk*. Hal. 183-199. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Jakarta.
- Undang Kurnia, N. Sinukaban, G.G. Suratmo, H. Pawitan, dan H. Suwardjo. 1997. Pengaruh teknik rehabilitasi lahan terhadap produktivitas tanah dan kehilangan hara. *Jurnal Tanah dan Iklim* 15: 10-18.
- Utomo, W. H., S. M. Sitompul, and M. van Noordwijk. 1992. Effect of leguminous cover crops on subsequent maize and soybean crops on an Ultisol in Lampung. *Agrivita*. 15:44-53.
- Wander, M. M., S. J. Traina, B. R. Stinner, and S. E. Peters. 1994. Organic and con-ventional management effects on biologically active soil organic matter pools. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 58: 1130-1139.
- Willey J.D., R.J. Keiber, M.S. Eyman, and G. Brooks Avery. 2000. Rain water dissolved organic carbon: concentration and global flux. *Globi Biogeochem Cycles* 14(1): 139-148.
- Yan, H., M. Cao, J. Liu, and B. Tao. 2007. Potential and sustainability for carbon sequestration with improved in agricultural soil in China. *Agriculture, Ecosystems, and environment* 121: 325-335.

- Yoo K., R. Amundson, A.M. Heimsath, and W.E. Detrich. 2006. Spatial pattern of soil organic carbon on hillslope: integrating geomorphic processes and the biological C cycle. *Geoderma* 130: 47-65.
- Zhang H., K.H. Hartge, and H. Ringe. 1997. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactibility. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 61: 239-245.

4. TEKNOLOGI PENGELOLAAN LAHAN GAMBUT DAN SUMBANGANNYA TERHADAP MITIGASI GAS RUMAH KACA

Maswar dan Ai Dariah

Peneliti Balitbangtan di Balai Penelitian Tanah

Pendahuluan

Lahan gambut bagi Indonesia memiliki nilai yang sangat penting karena menyediakan hasil hutan berupa kayu dan non kayu, menyimpan dan mensuplai air, menyimpan karbon, dan merupakan habitat bagi keanekaragaman hayati dengan berbagai jenis flora dan fauna langka yang hanya ada dijumpai pada ekosistem ini. Sejalan dengan meningkatnya pertumbuhan penduduk dan keterbatasan ketersediaan lahan untuk pengembangan berbagai sektor, seperti pertanian dan perkebunan untuk memenuhi ketahanan pangan, hutan tanaman industri (HTI) untuk industri kertas, maupun untuk pemukiman penduduk dan infrastruktur lainnya, menyebabkan pilihan mulai diarahkan pada lahan gambut.

Meskipun lahan gambut memiliki fungsi yang sangat strategis, namun karena Indonesia adalah produsen sekaligus konsumen utama untuk komoditi kayu, industri kertas, dan kelapa sawit dunia, menyebabkan alih fungsi atau reklamasi disertai pembuatan drainase lahan gambut alami di Indonesia tidak dapat dihindari. Alih fungsi lahan gambut telah terjadi semenjak beberapa dekade terakhir dan masih terus berlangsung sampai sekarang. Akibat dari konversi secara masal lahan gambut terus terjadi, menyebabkan Indonesia telah kehilangan hampir setengah dari tutupan vegetasi alami lahan gambutnya. Menurut Balitbangtan (2011), pada kondisi tahun 2012 hanya sekitar 8,8 juta hektar (55,5%) hutan gambut alami Indonesia yang masih tersisa.

Akibat eksploitasi hutan di lahan gambut alami yang tidak mengindahkan aspek konservasi, telah menyebabkan kondisi lahan gambut Indonesia sebagian besar telah mengalami kerusakan atau degradasi. Degradasi ini terutama terkait dengan alih fungsi lahan gambut alami, seperti menjadi semak belukar karena tanaman pertanian setelah diambil kayunya, dijadikan perkebunan kelapa sawit dan tanaman hutan industri, penipisan lapisan gambut (*subsidence*) akibat drainase dan peristiwa kebakaran. Saat ini paling sedikit 6 juta hektar lahan gambut alami yang telah dikonversi, dan sekitar 4 juta hektar dalam keadaan rusak, baik dari aspek komposisi vegetasi maupun tata airnya.

Konversi lahan dari semakin luasnya konversi dan/atau drainase lahan gambut menyebabkan semakin banyak bahan organik yang hilang karena pembusukan dan/atau terbakar yang menghasilkan emisi gas rumah kaca yang sangat banyak secara terus-menerus ke atmosfer. Berdasarkan laporan resmi pemerintah Indonesia, yaitu pada *International Second National*

Communication Under The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), emisi GRK dari lahan gambut mencapai 25% dari total emisi Indonesia (KLH 2009). Pada sisi lain, selain mengemisikan GRK asap yang timbul akibat kebakaran lahan gambut juga tersebar ke berbagai arah bahkan sampai melewati lintas batas negara yang menimbulkan gangguan serius terhadap transportasi dan kesehatan manusia. Sebagai contoh, munculnya asap serta kabut tebal akibat kebakaran hutan dan lahan gambut pada tahun 1997 di Sumatera dan Kalimantan menyebabkan berkurangnya jarak pandang di beberapa kota di Sumatera, Kalimantan, dan bahkan sampai ke negara tetangga Singapura dan Malaysia. Hal ini telah mengakibatkan penundaan beberapa jadwal penerbangan dan bahkan penutupan beberapa bandar udara, selain itu asap tersebut juga mengakibatkan gangguan kesehatan masyarakat.

Masih berlanjutnya proses degradasi lahan gambut alami di Indonesia sampai saat ini, diperkirakan akan memunculkan masalah di masa mendatang. Lahan gambut yang sudah dikonversi dan/atau didrainase, telah banyak menjadi lahan terlanjar (semak belukar), yaitu sekitar 3,8 juta hektar (Balitbangtan 2013) dengan kondisi yang telah berubah dari tidak mudah terbakar (karena selalu tergenang) menjadi sumber titik api (kebakaran). Menurut laporan DNPI dan JICA (2014), sepanjang tahun 2007 - 2013 dari hasil pengamatan citra satelit MODIS rata-rata *hotspots* setiap tahunnya di wilayah Indonesia sebanyak 16.570 titik yang sebagian besar berasal dari lahan gambut. Hilangnya vegetasi karena terbukanya hutan menyebabkan berkurangnya penyerapan CO_2 dan emisi GRK yang simultan pada lahan gambut meningkatkan gas rumah kaca di atmosfer, kedua hal ini semakin berpotensi menyebabkan pemanasan global dan perubahan iklim.

Selain kegagalan, banyak pula ditemukan keberhasilan pengelolaan lahan gambut dan telah menghasilkan dampak positif terhadap pertumbuhan ekonomi masyarakat di sekitarnya. Namun sebaliknya, daerah dengan pengelolaan lahan gambut yang buruk, telah memberikan dampak negatif terhadap lingkungan, ekonomi, dan juga kehidupan manusia. Berkaitan dengan hal tersebut, tulisan ini membahas mengenai lahan gambut secara lebih detail, manajemen pengelolaannya serta pengaruhnya terhadap emisi GRK.

Pembentukan dan Sifat Lahan Gambut

Di dalam bidang ilmu taksonomi tanah, gambut dikenal dengan istilah '*Histosols*', atau yang populer dalam bahasa Inggris disebut sebagai *organic soil* atau *peat*. Istilah 'gambut' sendiri berasal dari bahasa daerah Banjar, yaitu salah satu nama Kec. di Kalimantan Selatan (Sabiham 2006). Perbedaan antara profil tanah gambut dengan profil tanah mineral disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Perbedaan antara profil tanah mineral (kiri) dengan tanah gambut (kanan) (Foto: Maswar)

Menurut Soil Survey Staff (2010) tanah organik (*Histosols*) adalah tanah yang mempunyai sifat-sifat sebagai berikut:

1. Mempunyai bahan tanah organik mulai dari permukaan ke salah satu berikut:
 - a. Kedalaman 10 cm atau kurang dari kontak litik atau paralitik, asalkan ketebalan bahan tanah organik lebih dari dua kali ketebalan tanah mineral di atas kontak tersebut; atau
 - b. Kedalaman sebarang apabila bahan tanah organik berada di atas bahan fragmen (kerikil, batu, dan kerakal) dan celah-celahnya terisi oleh bahan tanah organik, atau berada di atas kontak litik atau paralitik; atau
2. Mempunyai bahan organik yang memiliki batas atas di dalam kedalaman 40 cm dari permukaan; dan
 - a. Mempunyai salah satu ketebalan berikut:
 - (i) 60 cm atau lebih, bila tiga perempat bagian atau lebih volumenya adalah serat, atau bulk density kurang dari $0,1 \text{ g/cm}^3$ (6,25 pon per kaki kubik); atau
 - (ii) 40 cm atau lebih, bila:
 - (a) Bahan tanah organik jenuh air dalam waktu lama (lebih dari 6 bulan) atau telah didrainase; dan
 - (b) Bahan organik terdiri dari bahan saprik atau hemik, atau terdiri dari bahan fibrik yang kurang dari tiga perempat bagian volumenya adalah serat dan bulk density $0,1 \text{ g/cm}^3$ atau lebih; dan

- b. Mempunyai bahan tanah organik yang:
- (1) Tidak memiliki lapisan mineral sampai setebal 40 cm baik pada permukaan ataupun yang batas atasnya di dalam kedalaman 40 cm dari permukaan; dan
 - (2) Tidak memiliki lapisan-lapisan mineral, yang secara kumulatif, sampai setebal 40 cm dari permukaan; dan
3. Tidak memiliki sifat-sifat tanah andik dalam lapisan setebal 35 cm atau lebih di dalam kedalaman 60 cm dari permukaan.

Luas lahan gambut di Indonesia diperkirakan sekitar 14,9 juta hektar (Balitbangtan 2011), yang sebagian besar tersebar di pulau Sumatera, Kalimantan, dan Papua. Kondisi tutupan lahan gambut Indonesia pada tahun 2013 disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Penggunaan lahan/penutupan vegetasi di lahan gambut Indonesia

Penggunaan lahan	Luas (juta ha)	%
Hutan	8,28	55,5
Perkebunan Sawit	1,54	10,3
Semak/belukar	3,8	25,5
Lahan pertanian	0,7	4,7
Bekas Konsesi tambang	0,61	4,1
Jumlah	14,93	100

Sumber data: Balitbangtan (2013)

Proses Pembentukan Gambut

Lahan gambut terbentuk karena pada kondisi alami akumulasi bahan organik lebih besar dari laju dekomposisinya sehingga terjadi penumpukan bahan organik (Zhang *et al.* 2002; Chmura *et al.* 2003). Faktor-faktor yang menyebabkan lambatnya laju dekomposisi, sehingga terjadi akumulasi bahan organik pada lahan gambut alami di antaranya adalah adanya bahan organik yang tidak mudah lapuk (Dai *et al.* 2002; White *et al.* 2002), rendahnya konsentrasi oksigen karena kondisi tergenang air, pH rendah, dan terbatasnya unsur hara (Hobbie *et al.* 2000; Dai *et al.* 2002; White *et al.* 2002; Yavitt *et al.* 2004). Pada kondisi anaerob, aktivitas mikroorganisme perombak bahan organik terhalang, sehingga proses dekomposisi bahan organik berjalan dengan lambat, akibatnya terjadi penumpukan bahan organik. Menurut Maas (2003) tanah gambut di daerah tropis terdiri dari bagian tumbuh-tumbuhan yang terhambat proses dekomposisinya akibat air tergenang secara permanen/suasana anaerob dan kahat hara. Bukti-bukti yang mengindikasikan lambatnya proses dekomposisi bahan organik pada lahan gambut adalah masih dapat ditemukannya bahan

organik dalam bentuk seperti aslinya seperti batang, cabang, dan akar-akar besar (Murdiaso *et al.* 2004).

Sarwono (2003) merangkum teori evolusi proses pembentukan gambut yaitu tahapan pertama, merupakan proses akumulasi bahan organik (menghasilkan bahan induk) yang dikenal dengan proses geogenesis; tahapan kedua, merupakan proses pematangan gambut yang terjadi pada awal reklamasi atau pengeringan tanah gambut dikenal dengan proses pedogenesis yang meliputi: (a) proses pematangan fisik, yaitu pematangan disebabkan oleh dehidrasi akibat pengeringan (drainase dan evaporasi); (b) proses pematangan kimia, terjadi karena bahan gambut kehilangan kelembapan dan masuknya udara ke dalam pori-porinya; (c) proses pematangan biologi, terjadi akibat pencampuran bahan gambut oleh mikrofauna, yang menghasilkan atau *mulu* yaitu gambut yang kadar bahan organiknya tinggi dan kandungan lainnya rendah. Pembentukan *mulu* terjadi pada tanah gambut yang mengandung liat dan pH tinggi sampai sedang. Sedangkan pembentukan *mader* terjadi pada lapisan atas (*top soil*) tanpa dan/atau dengan kadar liat yang rendah.

Menurut Sabiham (2006) proses pembentukan gambut di Indonesia sama dengan gambut di daerah tropis lainnya. Awal terbentuknya endapan gambut di Indonesia diperkirakan sekitar 11.000 BP (BP= *Before Present* yaitu dicatat sebelum tahun 1950). Kejadian terbentuknya endapan gambut di Indonesia berkaitan erat dengan peristiwa transgresi dan regresi air laut pada Zaman Kuarter (Holosen) yang membentuk dataran-dataran pantai dan daerah cekungan, seperti di pulau-pulau sekitar Dataran Sunda dan Dataran Sahul. Dengan adanya proses sedimentasi dan progradasi menyebabkan garis pantai cenderung bertambah ke arah laut. Daerah-daerah ini kemudian ditumbuhi oleh berbagai jenis vegetasi yang mampu beradaptasi dengan kondisi lingkungan dan mengisi cekungan-cekungan tersebut. Di daerah pantai dan dataran rendah (cekungan), mula-mula terbentuk gambut topogen karena kondisi anaerobik yang dipertahankan oleh tingginya permukaan air sungai, terjadi peningkatan penutupan serasah tanaman, menghasilkan pembentukan hamparan gambut selingen yang berbentuk kubah (*dome*).

Pengelompokan Gambut

Berdasarkan *Soil Survey Staff* (2010) berdasarkan tingkat kematangan atau kandungan serat, tanah gambut dikelompokkan menjadi tiga kategori yaitu (1) Fibrik, memiliki kandungan serat lebih dari 3/4 bagian volume tanah terdekomposisi <33%; (2) Hemik, kandungan seratnya antara fibrik dan saprik terdekomposisi 33 – 66%; dan (3) Saprik kandungan seratnya kurang dari 1/6 bagian dari volume tanah (terdekomposisi >66%). Secara umum dapat dijelaskan bahwa gambut fibrik adalah apabila bahan vegetasi aslinya masih dapat

diidentifikasi atau sedikit mengalami dekomposisi, hemik apabila tingkat dekomposisinya sedang, dan saprik apabila tingkat dekomposisinya telah lanjut.

Berdasarkan tingkat kesuburan alami, gambut dibagi dalam 3 kelompok yakni *eutrofik* (kandungan mineral tinggi), *oligotrofik* (miskin unsur hara atau kandungan mineral, terutama Ca rendah dan reaksi masam), dan *mesotrofik* (terletak di antara keduanya, kandungan basa sedang) (Andriess 1988).

Berdasarkan ketebalan, gambut Indonesia dikelompokkan dalam 4 kelas, yaitu: (1) dangkal, ketebalan 50 - 100 cm; (2) agak dalam, ketebalan 100 - 200 cm; (3) dalam, ketebalan 200 - 300 cm; dan (4) sangat dalam, ketebalan lebih dari 300 cm (Subagyo *et al.* 1996).

Menurut lingkungan pembentukan dan fisiografi lahan gambut dapat dibedakan atas empat tipe lahan gambut yaitu: 1) gambut cekungan (*basin peat*) adalah gambut yang terbentuk di daerah cekungan, lembah sungai atau rawa burit atau rawa belakang; 2) gambut sungai (*river peat*) adalah gambut yang terbentuk di sepanjang sungai yang masuk ke daerah lembah kurang dari 1 km; 3) gambut daratan tinggi (*highland peat*) adalah gambut yang terbentuk di punggung-punggung bukit atau pegunungan; dan 4) gambut daratan pesisir atau pantai (*coastal peat*) adalah gambut yang terbentuk di sepanjang garis pantai (Noor 2001).

Berdasarkan lingkungan tumbuh dan pengendapannya, gambut dapat dikelompokkan menjadi dua jenis yaitu: (1) gambut ombrogen adalah gambut yang airnya hanya berasal dari air hujan. Gambut jenis ini dibentuk dalam lingkungan pengendapan dimana tumbuhan pembentuk yang semasa hidupnya hanya tumbuh dari air hujan, sehingga kandungan mineralnya adalah asli (*inherent*) dari tumbuhannya itu sendiri; dan (2) gambut topogen adalah gambut yang airnya berasal dari air aliran permukaan. Jenis gambut ini diendapkan dari sisa tumbuhan yang semasa hidupnya tumbuh dari pengaruh elemen yang terbaui oleh air permukaan. Gambut topogen lebih subur digunakan untuk budi daya tanaman dibandingkan dengan gambut ombrogenous, karena gambut topogenous relatif mengandung lebih banyak unsur hara (Driessen dan Soepraptohardjo 1974).

Sifat-Sifat Tanah Gambut

Sifat alami gambut yang penting adalah sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan. Di antara sifat yang penting dari tanah gambut di daerah tropis adalah bahan penyusun berasal dari kayu-kayuan, dalam keadaan alami tergenang, mengembang (*swelling*) dalam keadaan jenuh, menyusut (*shrinking*) saat dikeringkan, mengalami penurunan permukaan (*subsidence*) karena drainase menyebabkan gambut kehilangan air yang banyak sehingga gambut menyusut dan sebagian hilang karena terdekomposisi, kering tidak balik (*irreversible drying*) karena kehilangan air atau kekeringan menyebabkan sifat

gambut yang suka air (*hidrophilic*) berubah menjadi menolak air (*hidrophobic*), sehingga akan membentuk pasir-semu (*pseudo sand*), pH sangat rendah dan status kesuburan tanah yang rendah terutama kandungan K, Ca, Mg, P, Cu, Zn, Mn, dan B (Widjaja-Adi 1988; Sabiham 2006).

Gambut tropika secara fisik, umumnya berwarna coklat kemerahan hingga coklat tua (gelap) tergantung tingkat dekomposisinya. Kandungan airnya tinggi dengan kapasitas memegang air 15-30 kali dari berat keringnya, *bulk density* tergolong rendah yaitu sekitar 0,05 - 0,3 g/cm³, dan porositas antara 75-95% volume. Keadaan ini menyebabkan terbatasnya pilihan komoditas yang dapat diusahakan (Ambak dan Melling 2000). Sebagai contoh, tiga komoditas yang umum diusahakan di lahan gambut dalam adalah kelapa sawit, karet, dan kelapa yang cenderung pertumbuhannya miring bahkan ambruk sebagai akibat akar tidak mempunyai tumpuan tanah yang kuat (Gambar 2).



Gambar 2. Pohon kelapa yang tumbuh miring dan rebah pada lahan gambut di Tanjung Jabung Barat, Jambi (kiri), dan pohon kelapa sawit tumbuh doyong pada lahan gambut dalam (> 3m) di Aceh Barat, Nanggroe Aceh Darussalam (kanan) (Foto: Maswar)

Gambut sebagai Penyimpan Karbon

Luas lahan gambut dunia hanya sekitar 3% dari luas permukaan bumi yaitu sekitar 400 juta hektar (Joosten dan Clarke 2002; Global Peatlands Initiative 2002; Hoojer *et al.* 2006), namun menyimpan karbon yang sangat banyak, yakni diperkirakan sebanyak 550 Giga ton, atau setara dengan 75% dari seluruh karbon di atmosfer (Alex dan Joosten 2008). Menurut Joosten (2009), berdasarkan data kondisi tahun 2008, gambut Indonesia menyimpan cadangan karbon peringkat ketiga terbesar di dunia (setelah Kanada dan Rusia), yakni sekitar 84.016 juta ton. Kondisi umum sebaran ketebalan dan simpanan karbon gambut Indonesia disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ketebalan dan simpanan karbon gambut pada beberapa Prov. yang mempunyai lahan gambut luas di Indonesia

Prov.	Titik pengamatan	Ketebalan gambut (cm)			Simpanan karbon (t/ha)		
		Minimum	Maksimum	Rata-rata	Minimum	Maksimum	Rata-rata
Nangroe Aceh Darussalam*	83	115	1000	458	382	3457	1488
Riau**	22	235	697	534	381	4219	2875
Jambi***	50	116	741	269	1005	6709	2183
Kalimantan Barat****	13	295	700	472	1803	3037	2403
Kalimantan Tengah**	36	50	700	463	174	6390	3082
Kalimantan Selatan****	45	50	338	135	128	1142	615
Papua***	16	50	400	232	155	1535	866

Sumber: Diolah dari data beberapa hasil kegiatan penelitian kerjasama lingkup BBSOLP yaitu: *Maswar 2011, **Agus F and Maswar 2013; *** ALLREDDI 2011; dan ****Maswar 2014

Penyebab Degradasi Lahan Gambut

Lahan gambut terdegradasi adalah gambut yang telah mengalami penurunan fungsi hidrologi, produksi, dan ekologi yang diakibatkan oleh aktivitas manusia. Berkaitan dengan hal tersebut, apabila sudah terjadi salah satu atau lebih indikator berikut berarti lahan gambut sudah mengalami degradasi yaitu: a) sudah ada penebangan pohon, b) ada jalan logging, c) bekas kebakaran, d) kering, e) penambangan (Balitbangtan 2013).

Lahan gambut pada kondisi alaminya adalah jenuh air sepanjang tahun. Pada kondisi alami tersebut, lahan gambut berfungsi sebagai penambat (*sequester*) karbon melalui proses fotosintesis tanaman yang mengabsorpsi CO_2 atmosfer dan menyimpannya sebagai materi organik dalam bentuk biomassa tanaman, baik yang masih hidup maupun yang sudah mati (serasah dan rekromas). Menurut Keddy (2000) diantara ekosistem yang ada di bumi ini, ekosistem lahan basah atau gambut adalah sistem yang paling produktif dalam menyerap karbon dari atmosfer melalui proses fotosintesis tumbuhan yakni mencapai 13 t C/ha/th dibandingkan hutan tropika sekitar 8 t C/ha/th . Karbon yang diserap oleh vegetasi dari atmosfer tersebut sebagian jatuh dan mengakumulasi dalam bentuk bahan tanah gambut. Menurut Bernal (2008), lahan basah daerah tropika di Costa Rica mengakumulasi sekitar $263 \text{ g C/m}^2/\text{th}$ dan lahan basah daerah *temperate* di Ohio mengakumulasi sekitar $140 \text{ g C/m}^2/\text{th}$. Namun, prediksi yang lebih rendah disampaikan oleh Chmura *et al.* (1993), yakni hanya sekitar $20\text{--}30 \text{ g C/m}^2/\text{th}$. Jadi terlihat jelas bahwa dalam kondisi alami lahan gambut berkontribusi nyata dalam mengurangi gas rumah kaca di atmosfer. Namun apabila hutan/vegetasi alami gambut tersebut ditebang atau lahan didrainase, maka karbon yang tersimpan pada vegetasi pada lahan gambut tersebut menjadi hilang, dan karbon yang tersimpan di tanah juga bakal teroksidasi atau terdekomposisi menghasilkan gas rumah kaca terutama CO_2 . Langkah selanjutnya, lahan gambut akan mengalami penurunan permukaan (*subsidence*). Pada kawasan yang terus mengalami *subsidence*, permukaan lahannya menjadi relatif lebih rendah sehingga lebih rawan terhadap banjir. Kondisi hal seperti itu terjadi di wilayah pantai maka akan menyebabkan intrusi air laut.

Dari berbagai data atau informasi yang beredar saat ini, terlihat bahwa konversi hutan gambut di daerah tropika menjadi bentuk penggunaan lain yang tidak sesuai dengan pembuatan saluran drainase telah menyebabkan kehilangan karbon yang sangat besar dan berkontribusi sangat besar pula terhadap emisi gas rumah kaca perubahan iklim global. Sebagai gambaran telah terjadinya konversi lahan gambut akibat pembuatan drainase terhadap lahan gambut dunia dapat dilihat dari gambar 1 dan ke-2 (Hooijer *et al.* 2008) yang mana seluas 65 juta hektar lahan gambut telah didrainase, dan telah mengemisikan CO_2 sebanyak 3 Giga t/tahun. Untuk wilayah Indonesia, menurut Hooijer *et al.* (2006), selama periode tahun

1985 – 2000, sebanyak 20% (rata-rata 1,3% per tahun) hutan gambut alami telah ditebang dan/atau dikonversi untuk penggunaan lain. Pada sisi lain, data konsesi menunjukkan bahwa 27% dari luas area konsesi untuk kelapa sawit dan hutan tanaman industri (HTI) berada pada lahan gambut.

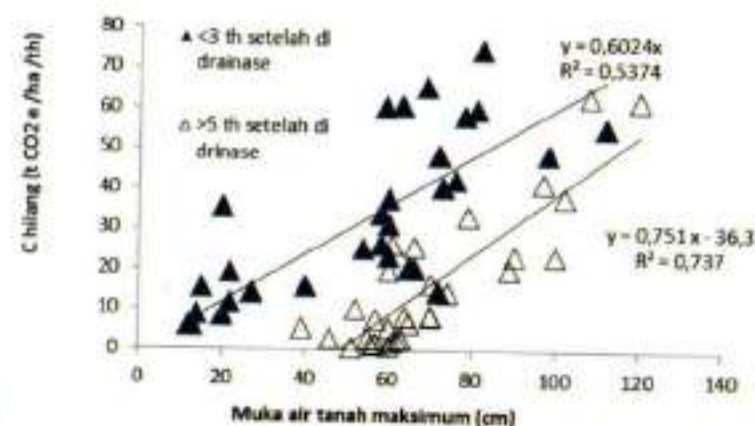
Emisi GRK Akibat Dekomposisi Gambut

Apabila terjadi konversi hutan gambut yang biasanya diikuti dengan pembuatan drainase, maka akan berdampak terhadap unit-unit hidrologi dari hutan rawa gambut tersebut. Pada saat tanah gambut yang didominasi oleh sisa tanaman (daun, dahan, ranting, dan batang) mengalami kondisi aerob menyebabkan aktivitas bakteri pembusuk akan meningkat. Setelah bakteri perombak mulai mendekomposisi gambut, karbon yang tersimpan dalam gambut akan teremis ke udara dalam bentuk CO_2 . Sebagai contoh, emisi tahunan CO_2 pada kondisi lahan gambut alami berkisar antara 1,35 – 3,40 t C /ha /th, namun setelah didrainase meningkat menjadi 1,60 – 4,60 t C /ha /tahun (Silvola *et al.* 1996). Kasus untuk ekosistem gambut tropika yang diwakili oleh Indonesia dan Malaysia misalnya, kehilangan karbon akibat oksidasi dari permukaan lahan gambut yang didrainase rata-rata sebesar 17,71 t C /ha /th (Hooijer *et al.* 2006). Informasi terbaru yang dilaporkan Husnain *et al.* (2013) emisi karbon dari lahan gambut yang didrainase di Indonesia adalah $17,98 \pm 6,81$ t C /ha /th; $16,07 \pm 5,18$ t C /ha /th; $16,62 \pm 6,81$ t C /ha /th; $14,17 \pm 4,63$ t C /ha /th masing-masing pada kebun kelapa sawit, kebun Akasia, hutan sekunder dan kebun karet secara berurutan, sedangkan pada lahan terlantar adalah sekitar $18,26 \pm 6,54$ t C /ha /th.

Drainase menyebabkan terjadinya perubahan keseimbangan ekosistem gambut yaitu dari sebagai penyimpan menjadi penyumbang emisi karbon (Canadell *et al.* 2007; Rieley *et al.* 2008). Menurut Joosten (2009), secara global emisi CO_2 dari lahan gambut yang didrainase telah meningkat dari 1.058 juta ton pada tahun 1990 menjadi 1.298 Mega ton pada tahun 2008 (> 20%). Peningkatan ini terutama terjadi di negara-negara sedang berkembang seperti Indonesia, China, Malaysia, dan Papua New Guinea. Khusus di Indonesia, menurut Hooijer *et al.* (2006) diperkirakan rata-rata 632 juta ton CO_2 (interval 355–874 juta ton CO_2) setiap tahun diemisikan dari lahan gambut yang didrainase. Data terbaru yang disampaikan Joosten (2009), bahwa perkiraan emisi CO_2 tahun 2008 dari lahan gambut Indonesia adalah yang tertinggi di dunia, yaitu sebanyak 500 juta ton dibandingkan Rusia di posisi kedua hanya sebesar 139 juta ton.

Secara umum, laju emisi CO_2 dari proses dekomposisi tanah gambut antara lain dipengaruhi oleh kedalaman dan umur drainase, kematangan gambut, dan suhu tanah. Menurut Charman (2002), mineralisasi karbon pada lahan gambut sangat dipengaruhi oleh muka air tanah dan suhu. Dari berbagai faktor tersebut kelihatannya, kedalaman dan umur drainase yang paling

berpengaruh terhadap laju dekomposisi gambut (Maswar 2011) seperti yang disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hubungan antara kondisi muka air tanah maksimum (dalam periode waktu satu tahun) dengan kehilangan/emisi karbon (Sumber data: diolah dari Maswar 2011)

Menurut Kirk (2004) pada kondisi alami lahan gambut, aliran air bawah tanah yang berasal dari lahan tanah mineral di sekitarnya membawa kation-kation basa masuk ke lahan gambut sehingga dapat menetralkan asam-asam organik gambut. Namun, setelah gambut didrainase, aliran air dari luar lahan gambut (kawasan tanah mineral) yang mengandung banyak kation-kation yang masuk ke area lahan gambut menjadi terhalang oleh saluran-saluran, sementara itu kation-kation basa tetap lebih banyak diambil oleh tanaman untuk meningkatkan pertumbuhannya. Hal inilah yang menyebabkan pH gambut menjadi turun.

Emisi GRK Akibat Kebakaran Lahan Gambut

Kebakaran pada lahan gambut umumnya terjadi pada lahan yang telah didrainase, dan merupakan salah satu bentuk penyebab hilangnya karbon. Apabila lahan gambut tersebut terbakar material gambut yang terbakar tersebut akan mengemisikan gas terutama CO_2 , N_2O , dan CH_4 ke udara dan berkontribusi terhadap proses pemanasan global dan perubahan iklim dunia (Najiyati *et al.* 2010). Kebakaran hutan gambut yang parah pernah terjadi di Indonesia pada tahun 1997, 1998, dan 2002, yang mana pada setiap tahun kejadian kebakaran tersebut diperkirakan sekitar 1,5 – 2,2 juta hektar lahan gambut terbakar di Sumatra dan Kalimantan (Hooijer *et al.* 2006). Menurut Ballhorn *et al.* (2009)

kebakaran seluas 13% (2,79 juta hektar) lahan gambut Indonesia pada tahun 2006 diperkirakan mengemisikan $98,38 \pm 180,38$ juta ton CO_2 .

Perkiraan emisi dari kebakaran gambut tidak terlepas dari tingginya ketidakyakinkan dalam penaksiran data aktivitas (luas lahan gambut yang terbakar) serta faktor emisi dari kebakaran gambut. Tidak semua peristiwa kebakaran lahan gambut berakibat pada hangusnya lapisan tanah gambut. Kebakaran lahan gambut bisa menghanguskan sebagian atau semua biomas tanaman di atas permukaan tanah tanpa mempengaruhi lapisan tanah gambut (pengamatan penulis langsung di lapang Gambar 4). Dalam keadaan ekstrim, seperti yang terjadi pada tahun El Nino 1997, kebakaran gambut di Kalimantan Tengah dapat menghanguskan lapisan gambut sampai mendekati ketebalan 1 m (Page *et al.* 2002).



Gambar 4. Contoh lokasi bekas kebakaran lahan gambut pada bulan Juli 2009 di Desa Simpang Kec. Kawai XVI, Kab. Aceh Barat, Prov. Nangroe Aceh Darussalam (kiri) dan di Siak, Prov. Riau pada bulan Maret 2014, yang menggambarkan bahwa tidak semua biomassa tanaman yang terbakar pada peristiwa kebakaran tersebut (Foto: Maswar)

Dari peristiwa kebakaran di Desa Simpang Kec. Kawai XVI, Kab. Aceh Barat, Prov. Nangroe Aceh Darussalam tahun 2009 yang membakar sekitar 40 cm lapisan serasah tanah gambut (Gambar 4 kiri), diperkirakan karbon yang hilang adalah sekitar 92 t C/ha atau setara $338 \text{ t CO}_2 \text{ e/ha}$ (Maswar 2011).

Teknologi Konservasi dan Hubungannya dengan Mitigasi Emisi GRK pada Lahan Gambut

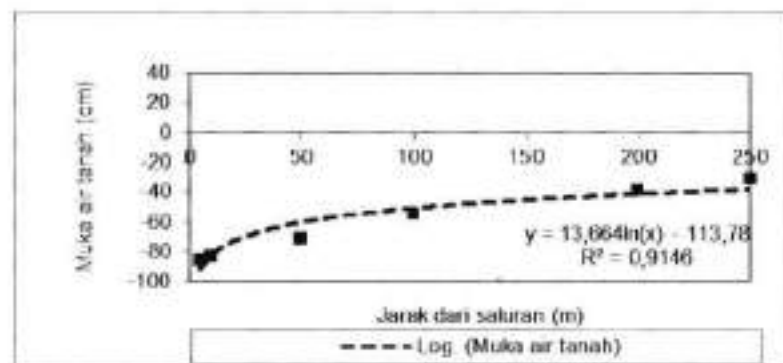
Ada beberapa opsi teknologi dalam pengelolaan lahan gambut berkelanjutan dari ramah lingkungan, diantaranya adalah:

Pengaturan Tata Air

Untuk menghindari dekomposisi material gambut dan *subsidence* yang berlebihan serta mengatasi kekurangan air dimusim kering pada lahan gambut yang telah di drainase, maka kedalaman muka air tanah perlu dikontrol melalui pembuatan dam atau penyekat air (Gambar 5). Oleh karena karakteristik gambut sangat unik, supaya air hujan tidak mengalir sebagai aliran permukaan (*run off*) tetapi sebagai aliran bawah tanah, maka desain dari saluran drainase seharusnya berdasarkan kepada karakteristik hidraulik tanah gambut tersebut, yaitu dengan mempertimbangkan kecepatan infiltrasi, kapasitas penyimpanan air dan permeabilitas. Menurut Wösten dan Ritzen (2001), untuk drainase lahan gambut tropika, pendekatan menurut "*persamaan Hooghoudt*" dapat digunakan untuk menentukan jarak antar saluran drainase. Jarak antar saluran drainase dapat berdasarkan kepada keperluan drainase, selama kondisi muka air tanah normal, sedangkan dimensi saluran berdasarkan kepada kondisi tinggi muka air tanah. Dalam keadaan tidak tergenang muka air tanah membentuk hubungan logaritmik dengan jarak tegak lurus dari saluran drainase; semakin dekat jarak suatu titik dengan saluran drainase, maka muka air tanahnya jauh lebih dalam di bawah permukaan tanah dan semakin jauh jarak suatu titik dari saluran drainase, muka air tanahnya semakin dangkal (Gambar 6).



Gambar 5. Saluran drainase pada lahan gambut (kiri) dan pintu air pengontrol kedalaman muka air di saluran drainase (kanan) (Foto: Maswar)



Gambar 6. Hubungan antara kedalaman muka air tanah dengan jarak lokasi dari saluran drainase (ketebalan gambut sekitar 10 m) pada jenis penggunaan lahan hutan sekunder di Desa Simpang, Kec. Kwai XVI, Kab. Aceh Barat, Prov. Nanggroe Aceh Darussalam (Sumber: Maswar 2011)

Penggunaan Amelioran

Sifat fisika dan/atau kimia tanah gambut dapat diperbaiki dengan menggunakan amelioran berupa bahan organik atau anorganik. Secara teoritis, amelioran yang ideal adalah bahan yang mempunyai sifat-sifat kejenuhan basa tinggi, dapat meningkatkan pH gambut, serta memiliki kandungan unsur hara yang lengkap, sehingga dapat berfungsi sebagai pupuk dan mempunyai kemampuan memperbaiki struktur tanah gambut. Jenis-jenis amelioran yang telah banyak diuji coba di Indonesia, khususnya pada lokasi-lokasi transmigrasi di lahan gambut adalah abu vulkan, kapur, tanah mineral, abu kayu/serasah hasil pembakaran, abu limbah pertanian, dan pupuk kandang (Pramono 2004).

Keberadaan bahan mineral atau amelioran pada gambut juga dapat melindungi karbon organik dari proses mineralisasi melalui perlindungan secara fisik dan/atau stabilisasi secara kimia. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kation-kation terutama yang *divalent* dan *trivalent* dapat berasosiasi dengan bahan organik, sehingga mampu melindungi karbon organik dari proses degradasi. Kation-kation yang dapat dipertukarkan seperti Al, Ca, Mg, dan Fe, di samping dapat meningkatkan interaksi antara mineral dengan bahan humik, juga mampu meningkatkan ikatan molekul bahan humik sehingga sulit terdegradasi. Pada kondisi terjadinya pembentukan kompleks antara kation-kation dengan asam-asam organik yang berasal dari hasil dekomposisi bahan organik menunjukkan bahwa kation-kation mampu berperan dalam meningkatkan daya sangga ekosistem (Cruz-Guzman *et al.* 2003).

Abu vulkan: Abu vulkan merupakan penyubur tanah gambut dengan bahan dasar abu vulkan. Bahan ini dapat memperbaiki kesuburan gambut, menaikkan

pH, pematangan bahan organik, penurunan nisbah C/N, penambah hara fosfor, kalium, kalsium, magnesium, serta meningkatkan kejenuhan basa. Rata-rata dosis pemakaian abu vulkan adalah sekitar 4 t/ha. Kendala pemanfaatan abu vulkan adalah masalah transportasi karena tidak terdapat di sekitar lokasi dan masih harus diikuti dengan penambahan kapur dan pupuk NPK.

Kapur: Kapur dapat berfungsi untuk menaikkan pH gambut, mengikat asam organik, mensuplai unsur K, Ca, dan/atau Mg, serta meningkatkan kejenuhan basa. Menurut Adhi (1986), pemberian kapur merupakan syarat utama untuk memperbaiki kesuburan tanah gambut. Berdasarkan informasi dari beberapa orang petani sayuran di lahan gambut di Desa Kalampangan, Kota Palangkaraya (personel komunikasi), pemakaian kapur antara 3 – 5 t/ha sangat nyata meningkatkan hasil budi daya tanaman di lahan gambut. Kelemahan kapur bila digunakan sebagai bahan amelioran adalah kandungan unsur haranya yang tidak lengkap, sehingga harus diikuti dengan pemupukan lainnya seperti NPK dan unsur mikro, tidak dapat membentuk kompleks jerapan dan kurang mampu memperbaiki struktur tanah. Kapur cenderung menggumpal jika diberikan terhadap tanah gambut yang kelembapannya rendah.

Tanah mineral: Tanah mineral bisa digunakan sebagai amelioran karena mempunyai kejenuhan basa lebih tinggi dari tanah gambut serta kandungan unsur haranya lebih lengkap. Penambahan tanah mineral selain memperbaiki sifat kimia, juga memperbaiki sifat fisika tanah gambut. Dosis tanah mineral yang biasa digunakan pada saat awal pemberian adalah sekitar 1 – 4 t/ha (personel komunikasi dengan petani sayur pada lahan gambut di Kalampangan, Palangkaraya, dan Kalimantan Tengah).

Abu sisa pembakaran: Abu merupakan sisa hasil pembakaran bahan organik, seperti kayu, sampah, gulma, gergaji kayu, sisa hasil pertanian seperti sekam dan serasah. Kelebihan abu adalah mengandung unsur hara yang lebih lengkap baik unsur makro maupun mikro, mempunyai pH tinggi (8,5 – 10,0), kandungan unsur seperti K, Ca, dan Mg tinggi. Namun demikian, apabila dibandingkan dengan kapur kemampuannya menaikkan pH lebih rendah. Abu banyak mengandung silikat (Si) dalam bentuk tersedia, sehingga dapat berpengaruh positif terhadap produktivitas tanaman terutama padi.

Pupuk kandang: Pupuk kandang dapat mempercepat proses pematangan gambut sehingga dapat memperbaiki kondisi fisik dan kimia gambut. Selain menyediakan unsur hara, pupuk kandang yang mengandung mikroorganisme dapat menguraikan gambut menjadi lebih matang, sehingga beberapa unsur hara menjadi lebih tersedia bagi tanaman. Pupuk kandang banyak digunakan oleh transmigran di lahan gambut. Pemberian pupuk kandang harus disertai dengan pemberian bahan lain seperti kapur/dolomit dan pupuk lainnya.

Untuk menentukan amelioran yang sesuai untuk penyubur tanah gambut, perlu dipertimbangkan beberapa faktor, di antaranya apakah bahan tersebut mudah diperoleh di sekitar lokasi, kualitas bahan, dan ketersediaan bahan apabila dimanfaatkan terus-menerus tanpa merusak lingkungan.



Gambar 7. Keberhasilan petani di Desa Kalamangan, Kec. Sebangau, Palangkaraya dalam mengelola lahan gambut dengan memadukan teknik konservasi tanah berupa saluran buntu (kiri) dan aplikasi amelioran tanah mineral + abu + dolomit + pupuk kandang untuk tanaman yang dibudi dayakan. Gambar kanan menunjukkan keragaan tanaman yang diberi amelioran (Foto: Maswar)

Penutup

Lahan gambut sangat spesifik karakteristiknya dan pada dasarnya berkesuburan rendah untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Pada kondisi alami lahan gambut berfungsi sebagai penyerap karbon dari atmosfer (memitigasi GIK terutama CO_2). Namun, konversi dan drainase lahan gambut untuk berbagai keperluan pembangunan menyebabkan gambut berubah sifatnya dari penyerap menjadi sumber emisi CO_2 .

Hal yang penting diperhatikan dalam pengelolaan lahan gambut ke depan adalah menjaga kelestarian dan stabilitasnya, karena pemanfaatan lahan gambut sampai saat ini telah menjadikannya sebagai pusat pertumbuhan penduduk (pada lokasi transmigrasi) dan pertumbuhan ekonomi baru di Indonesia seperti pada lokasi-lokasi perkebunan (kelapa sawit, karet, dan HTI) di Aceh, Riau, Jambi, Sumatera Selatan, Kalimantan Barat, Kalimantan Tengah, dan Kalimantan Selatan. Namun demikian, pada sisi lain masih ada kekhawatiran bahwa pengelolaan lahan gambut terutama konversi hutan dan drainase berdampak negatif terhadap lingkungan seperti peningkatan risiko kebakaran, penurunan

permukaan gambut (*subsidence*), dan emisi gas rumah kaca. Berkaitan dengan hal ini, adanya potensi tidak lestarnya pengelolaan lahan gambut perlu diminimumkan, dengan mengembangkan teknologi pengelolaan lahan gambut yang baik dan telah teruji keberhasilannya.

Daftar Pustaka

- Agus, F and Maswar. 2013. Agroforest Options for Low Emission Use of Peat Scrub Areas. REALU II Final Report. Indonesian Soil Research Institute, Bogor. 15 pages.
- Alex, K dan H. Joosten. 2008. Global Peatland Assessment. Factbook for UNFCCC policies on peat carbon emission. Wetlands International.
- ALLRED01. 2011. Accountability and Local Level Initiative to Reduce Emission from Deforestation and Degradation in Indonesia. Final Report. World Agroforestry Centre. 82 pages.
- Antik, K dan L. Melling. 2000. Management practices for sustainable cultivation of crop plants on tropical peatlands. Proc. of The International Symposium on Tropical Peatlands 22-23 November 1999. Bogor-Indonesia. 119 hal.
- Andriase, JP. 1988. Nature and management of tropical peat soils. FAO Soils Bulletin 59. Soil Resources, Management and Conservation Service FAO Land and Water Development Division.
- Bakhtiar, 2011. Peta Lahan Gambut Indonesia Skala 1 : 250.000. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Bakhtiar. 2013. Pengelolaan Berkelanjutan Lahan Gambut Terdegradasi untuk Mengurangi Emisi GRK dan Mengoptimalkan Produktivitas Tanaman. Materi pada Workshop on Degraded Peatland yang Digagas bersama antara Litbang, Kementan dengan Bappenas melalui Proyek RCTP, pada tanggal 6 Nov 2013. (Dalam proses publikasi).
- Bolton, D., P. Siegert, M. Mason, and S. Limin. 2009. Derivation of burn scar depths and estimation of carbon emissions with LIDAR in Indonesian peatlands. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (online). The paper can be read and downloaded at www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0906457106.
- Brink, R. 2008. Carbon Pools And Profiles In Wetland Soils: The Effect of Climate and Wetland Type. M.S. Thesis, presented in partial fulfillment of the requirements for Master's degree in the Graduate School of the Ohio State University.

- Canadell JG, Pataki DE, Gifford R, Houghton RA, Luo Y, Raupach MR, Smith P, and Steffen W. 2007. Saturation of the terrestrial carbon sink. Pp. 59-78 *In*: Canadell, J.G., D. E. Pataki and L. Pitelka (Eds.). *dalam Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Berlin, Springer Verlag.
- Chmura GL, Anisfeld C, Cahoon DR, and Lynch JC. 2003. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles*. 17: 1111, doi: 10.1029/2002GB001917.
- Charman D. 2002. *Peatlands and environmental change*. Wiley, Chichester.
- Cruz-Guzman MR, Celis R, Hermosin MC, Leone P, Negre M, and Cornejo J. 2003. Sorption-desorption of lead (II) and mercury (II) by model association of soil colloids. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1378-1387.
- Dai XY, White D, and Ping CL. 2002. Evaluation of soil organic matter composition and bioavailability by Pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry. *Journal of Analytical Applied Pyrolysis*. 62: 249-258.
- Dewan Nasional Perubahan Iklim (DNPI) dan Japan International Cooperation Agency (JICA). 2014. *Updating Indonesia's Green House Gas Abatement Cost Curve*.
- Driessen PM dan Soepraptohardjo M. 1974. *Soil for Agricultural Expansion in Indonesia*. Soil Research Institute, Bogor.
- Global Peatland Initiative. 2002. *World Peatland Map*.
- Hobbie S, Schimel J, Trumbore S, and Randerson J. 2000. Controls over carbon storage and turnover in high-latitude soils. *Global Change Biology*. 6, Suppl. 1: 196-210.
- Hooijer A, Silvius M, Wosten H, and Page S. 2006. *PEAT CO₂, Assessment of CO₂ Emission from drained peatlands in SE Asia*. Wetland International and Delft Hydraulics report Q3943.
- Hooijer A, Page S, Canadell JG, Silvius M, Kwadijk J, Wosten H, and Jauhiainen J. 2010. Current and future CO₂ emissions from drained peatlands in Southeast Asia. *Biogeosciences* 7: 1505-1514.
- Husnain, I. G. Putu Wigana IGP, Al Dariah, Marwanto S, Setyanto P., and Agus F. 2013. CO₂ emissions from tropical drained peat in Sumatra, Indonesia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change An International Journal Devoted to Scientific, Engineering, Socio-Economic, and Policy Responses to Environmental Change*. Mitig Adapt Strateg Glob Change. DOI 10.1007/s11027-014-9550-y.
- Joosten, H. and Clarke D. 2002. *Wise Use of Mires and Peatlands – Background and Principles Including a Framework for Decision-Making*. International Mire Conservation Group / International Peat Society. 304pp.

- Joosten, H. 2009. *Peatland Status and Drainage Related Emissions in All Countries of The World*. The Global Peatland CO₂ Picture. Wetlands International. www.wetlands.org. 35p.
- Keddy, PA. 2000. *Wetland Ecology: principles and conservation*. Cambridge University Press. Cambridge, U.K.
- Kirk, G. 2004. *The Biogeochemistry of Submerged Soils*. John Wiley & Sons, Ltd. 291 hal.
- KLH (Kementerian Lingkungan Hidup). 2009. *Indonesia Second National Communication Under The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*. Ministry of Environment, Indonesia. Jakarta.
- Maas, A. 2003. *Peluang dan Konsekuensi Pemanfaatan Lahan Rawa pada Masa Mendatang*. Pengukuhan Guru Besar. Universitas Gajah Mada. Yogyakarta.
- Naawar. 2011. *Kajian Cadangan Karbon pada Lahan Gambut Tropika yang DRAINASE untuk Tanaman Tahunan*. Disertasi Program Doktor (S.3), Program Studi Ilmu Tanah, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Naawar. 2014. *Cadangan Karbon dan Laju Subsiden pada Beberapa Kondisi dan Lokasi Tanah Gambut Tropika Indonesia*. Laporan sub. Kegiatan ICCTF. Kementan. (Dalam proses publikasi).
- Hurdiyanto D, Rosalina U, Hairiah K, Muslihat L, Suryadiputra INN, dan Jaya A. 2004. *Petunjuk Lapangan Pendugaan Cadangan Karbon pada Lahan Gambut*. Proyek Climate Change, Forest and Peatlands in Indonesia. Wetlands International-Indonesia Programme dan Wildlife Habitat Canada. Bogor.
- Naawar B, Asmana A, dan Suryadiputra INN. 2005. *Pemberdayaan Masyarakat di Lahan Gambut*. Proyek Climate Change, Forest and peatlands in Indonesia. Wetlands International-Indonesia Programme dan Wildlife Habitat Canada. Bogor.
- Rees H. 2001. *Pertanian Lahan Gambut: Potensi dan Kendala*. Kanisius. 174 hal.
- Sjöden H, Alm J, Silvola J, Tolonen K, and Martikainen PJ. 1998. Methane fluxes on boreal peatlands of different fertility and the effect of long-term experimental lowering of the water table on flux rates. *Global Biogeochem. Cycles* 12: 53-69.
- Stolt R, Siebert F, Rieley JO, Boehm HV, Jayak A, and Limin S. 2002. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia (Bali 1997). *Nature* 420:61-65.
- Wetlands Int. 2004. *Transmigration Development in The Peatlands, Its Prospect and Problems*. Makalah dipresentasikan di Workshop on Assessment, Conservation, Restoration and Sustainable Use of Tropical Peatland and

- Peat Swamp Forest Biodiversity in Pontianak, 14-16, April 2004. (Tidak dipublikasi).
- Rieley JO, R.A.J. Wüst, J. Jauhiainen, S.E. Page, H. Ritzema, H. Wösten, A. Hooijer, F. Siegert, S. Limin, H. Vasander, and M. Stahlhut. 2008. Tropical Peatlands, carbon stores, carbon gas emissions and contribution to climate change processes. Pp. 148-181 in M. Strack (eds.). *Peatlands and Climate Change*. IPS. Saarijärvi.
- Sabiham, S. 2006. Pengelolaan Lahan Gambut Indonesia Berbasis Keunikan Ekosistem. Orasi Ilmiah Guru Besar tetap Pengelolaan Tanah. Fakultas Pertanian Institut Pertanian Bogor.
- Sarwono, H. 2003. Ilmu Tanah. Jakarta: Akademika Pressindo. 354 halaman.
- Silvola J., Alm J., Ahlholm U., Nykanen H. and Martikainen P.J. 1996. CO₂ fluxes from peat in boreal mires under varying temperature and moisture conditions. *Journal of Ecology* 84: 219-228.
- Soil Survey Staff. 2010. Key to soil taxonomy 11th United States Departement of Agriculture Natural Resources Conservation Service.
- Subagyo, Marsoedi, dan Karama S. 1996. Prospek Pengembangan Lahan Gambut untuk Pertanian. Pada Seminar Pengembangan Teknologi Berwawasan Lingkungan untuk Pertanian pada Lahan Gambut, 26 September 1996. Bogor. (Tidak dipublikasikan).
- Susanne MS and Price JS. 1999. Soil water flow dynamics in managed cutover peat field, Quebec: Field and laboratory investigations. *Water Resources Research*. 35 (12): 3675 - 3683.
- White DM, Garland DS, Dai X, and Ping CL. 2002. Fingerprinting soil organic matter in the Arctic to help predict CO₂ flux. *Journal of Cold Regions Science and Technology* 35: 185-194.
- Widjaja Adhi, I.P.G. 1986. Pengelolaan lahan rawa pasang surut dan lebak. *Jurnal Litbang Pertanian* V (1): 1 - 9.
- Widjaja Adhi, I.P.G. 1988. Masalah Tanaman di Lahan Gambut. Makalah pada Pertemuan Teknis Penelitian Usahatani Menunjang Transmigrasi Cisarua Bogor, 27-29 Februari. 16 halaman. (Tidak dipublikasikan).
- Wösten JHM, and Ritzema HP. 2001. Land and water management options for peatland development in Sarawak, Malaysia. *International Peat Journal* 11: 59-66.
- Yavitt J, Williams C, and Wieder R. 2004. Soil chemistry versus environmental controls on production of CH₄ and CO₂ in northern peatlands. *European Journal of Soil Science* 56 (2): 169-178.

- Zhang Y, Li C, Trettin CC, Li H, and Sun G. 2002. An integrated model of soil, hydrology and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles* 16: GB001838.

5. SISTEM PERTANIAN NIR LIMBAH DAN EFISIEN KARBON

Umi Haryati dan S. Sutono

Peneliti Balitbangtan di Balai Penelitian Tanah

Pendahuluan

Iklim merupakan salah satu faktor terpenting yang menyebabkan variabilitas produksi tanaman dari tahun ke tahun, bahkan pada tingkat produksi tinggi dan lingkungan produksi yang optimal. Perubahan iklim global kini sedang terjadi dan telah mempengaruhi berbagai aspek kehidupan manusia. Di sektor pertanian, dampak perubahan iklim dapat menurunkan produksi dan produktivitas komoditas pangan (Las *et al.* 2010). Oleh karena itu, upaya-upaya untuk mengurangi beban kerugian karena perubahan iklim (kekeringan, banjir, dan kondisi iklim ekstrim) perlu diantisipasi dengan mengenal dan memahami perilaku iklim dan melakukan penyesuaian-penyesuaian yang tepat untuk memperoleh hasil yang optimal. Orientasi peningkatan produksi perlu diimbangi dengan ketersediaan fasilitas dan infrastruktur usaha tani pendukung.

Pembangunan pertanian Indonesia ke depan dihadapkan pada tantangan bagaimana memantapkan ketahanan pangan nasional yang berkelanjutan dan meningkatkan kesejahteraan petani (Haryono dan Las 2011) sekaligus juga harus dapat menjaga keberlanjutan (*sustainability*) dan kelestarian sumber daya. Tantangan lainnya adalah mengupayakan tercapainya *Millenium Development Goals* (MDG's) yang mencakup penurunan angka kemiskinan, pengangguran, dan rawan pangan (Las *et al.* 2010). Sementara itu pada skala global, sektor pertanian dituntut untuk meningkatkan kepedulian terhadap ancaman pemanasan global melalui usaha adaptasi dan mitigasi emisi gas rumah kaca (GRK) (Las *et al.* 2010; Agus 2012).

Pemmasalahan global tersebut salah satunya dapat diantisipasi melalui pengembangan pertanian yang berpotensi menekan kehilangan karbon atau rendah emisi GRK. Berkaitan dengan hal ini, Presiden Republik Indonesia, Susilo Bambang Yudhoyono, dalam pertemuan G20 di Pittsburg, Pennsylvania Amerika Serikat, telah mencanangkan komitmennya pada dunia bahwa Indonesia akan menurunkan emisi sebanyak 26% dengan upaya sendiri dan 41% dengan bantuan dana multilateral/bilateral pada tahun 2020. Hal ini juga disampaikan oleh presiden Republik Indonesia pada pertemuan perubahan iklim PBB yaitu *Conference of the Parties (COP-15)* di Kopenhagen pada tanggal 7-18 Desember 2009.

Untuk menunjang upaya tersebut, pemerintah telah menerbitkan Peraturan Presiden tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAN-PE-GRK) no 61/2011 dan Peraturan Presiden no 71/2011 tentang

Inventory Gas Rumah Kaca yang mana dalam RAN-GRK tersebut hampir 90% target penurunan emisi adalah berasal dari sektor berbasis lahan (*land base*).

Pemanasan global diduga sebagai penyebab utama terjadinya perubahan iklim. Meningkatnya suhu global diperkirakan sebagai akibat dari meningkatnya emisi GRK yang dilepaskan dari berbagai sumber emisi, khususnya dari pemanfaatan energi fosil oleh berbagai aktivitas manusia. Emisi GRK telah mengalami peningkatan yang sangat cepat, khususnya gas karbondioksida (CO_2), metana (CH_4), dan nitrous oksida (N_2O) yang memiliki sifat seperti kaca sehingga adanya gas ini di atmosfer akan menimbulkan efek rumah kaca. Perubahan iklim ini telah mempengaruhi kegiatan-kegiatan pada sektor pertanian, termasuk kegiatan usaha tani pangan yang dapat mengakibatkan gagal panen.

Adaptasi perubahan iklim perlu ditingkatkan dalam konteks pembangunan ekonomi nasional terutama yang berkaitan dengan dampak penurunan produksi tingkat nasional pada ketahanan pangan, dan pengeluaran negara untuk impor pangan, atau penurunan pendapatan dari kegiatan ekspor. Pertanian efisien karbon (*carbon efficient farming = CEF*) merupakan salah satu bentuk adaptasi teknologi dalam sistem pertanian terhadap perubahan iklim tersebut diatas.

Pertanian efisien karbon (CEF) merupakan model usaha tani yang memadukan berbagai inovasi teknologi sehingga bisa lebih beradaptasi terhadap perubahan iklim dan meningkatnya sequestrasi karbon secara optimal, dengan mempertimbangkan aspek yang bersifat spesifik lokasi. Diantara inovasi teknologi yang efisien karbon adalah optimasi pemanfaatan lahan, pemanfaatan limbah organik, pemanfaatan sumber daya air secara optimal, peningkatan pendapatan petani diantaranya melalui pemeliharaan ternak, perbaikan kualitas tanah, pemanfaatan sumber energi terbarukan/bioenergi, dan peningkatan indeks pertanaman (IP) usaha tani pangan.

Teknik dan praktek pertanian efisien karbon bertujuan untuk menurunkan emisi GRK, efisiensi penggunaan energi dan sumber daya. Selain itu, pertanian efisien karbon tidak hanya mempunyai pengaruh lingkungan yang positif tetapi juga akan menjadikan pertanian secara umum lebih efisien dan juga memberikan keuntungan ekonomi.

Pengelolaan limbah pertanian di dalam sistem pertanian konvensional kurang optimal, karena seringkali limbah pertanian diangkut keluar sistem pertanian, sehingga terjadi pengurasan bahan organik. Apabila limbah pertanian tersebut (*by product*) diberikan ke ternak, hal tersebut juga tidak kembali ke tanah, karena kotoran hewan (kohe) yang dihasilkan tidak dikembalikan ke tanah secara optimal. Dengan demikian, bahan organik di dalam tanah lama kelamaan menjadi berkurang dan lahan menjadi terdegradasi.

Di dalam sistem pertanian nir limbah, diusahakan tidak ada limbah yang terbuang melainkan terus berada di dalam siklus sistem pertanian tersebut. Limbah pertanian yang berasal dari suatu subsistem di dalam sistem pertanian

tersebut bisa menjadi input di dalam subsistem yang lainnya sehingga limbah tersebut mempunyai nilai tambah di dalam sub sistem lainnya. Dengan demikian tidak ada limbah yang terbuang di dalam sistem pertanian tersebut.

Makalah ini mengemukakan tentang konsep sistem pertanian nir limbah dan efisien karbon (definisi dan kriteria), integrasi tanaman-ternak sebagai salah satu contoh pertanian nir limbah dan efisien karbon, serta rancang bangun sistem pertanian efisien karbon (CEF) di Kebun Percobaan (KP) Jakenan, Kab. Pati, Jawa Tengah dan KP Tamanbogo, Kab. Lampung Timur, Lampung.

Konsep Pertanian Efisien Karbon dan Nir Limbah

Definisi Pertanian Efisien Karbon / Carbon Efficient Farming (CEF)

CEF didefinisikan sebagai sistem pertanian yang memanfaatkan secara optimal karbon yang dikandung oleh bahan organik sisa tanaman dan limbah ternak sehingga memberikan nilai tambah berupa peningkatan produktivitas, pendapatan petani dan efisiensi energi serta penurunan emisi gas rumah kaca dan perbaikan lingkungan (Las *et al.* 2010; Haryono dan Las 2011).

Komponen utama CEF adalah a) pemanfaatan hasil samping (*by product*) pertanian, b) pengintegrasian beberapa sub sistem untuk meningkatkan nilai limbah *by product*, c) pengembangan pupuk organik, pembenah tanah, pakan ternak, dan bahan bakar terbarukan. Melalui penerapan CEF diharapkan penggunaan pupuk buatan, energi tidak terbarukan, serta emisi GRK, dan pencemaran lingkungan dapat dikurangi (Las *et al.* 2010; Haryono dan Las 2011).

Sistem pertanian efisien karbon sering disebut juga sebagai pertanian hijau (*Green Farming*) (<http://www.litbang.deptan.go.id/berita/one/956>) atau Kang (2013) menyebutnya sebagai sistem pertanian karbon rendah (*Low Carbon Farming*). Pertanian karbon rendah (*low-carbon agriculture*) atau pertanian efisien karbon merupakan teknologi yang menyimpan/menghemat energi, teknologi padat karbon dan juga merupakan sistem pertanian yang dapat memproduksi kembali (*reproducible*) limbah atau hasil sampingan agar dapat dimanfaatkan kualitas lingkungan lokal dan global (Kang 2013).

Pengayaan *pool* karbon organik tanah melalui olah tanah konservasi, pengapuran insitu residu tanaman, dan penggunaan tanaman penutup tanah dapat berkontribusi terhadap pengkayaan (sequestrasi karbon tanah, SCS). Rekomendasi *management practices* (RMPs) sistem pertanian karbon (*carbon smart*) atau pertumbuhan karbon (*growing carbon*) ketika karbon disimpan di tanah atau diperdagangkan sebagai komoditas pertanian (misalnya daging, telur, susu, daging, dan ternak) (Lal 2007).

Kriteria Pertanian Efisien Karbon (CEF)

Penggunaan energi rendah (*low energy*), emisi rendah (*low release*) dan pencemaran rendah (*low pollute*) merupakan karakteristik dari pertanian efisien karbon (*low-carbon agriculture*) (Kang 2013). Ciri atau kriteria pertanian efisien karbon (CEF) (Las *et al.* 2010; Haryono dan Las 2011; Kang 2013) adalah:

- Produksi dan keuntungan tinggi (*High production and profitability*)
- Rendah emisi GRK (*Low greenhouse gases emission*)
- Efisiensi penggunaan air tinggi (*Water use efficiency = WUE*)
- Nir Limbah (*Zero waste*), dan
- Erosi dan sedimentasi rendah (*Clean run-off*)

Ke 5 aspek kriteria atau ciri di atas dalam sistem pertanian efisien karbon (CEF) harus berjalan secara simultan atau berjalan secara bersamaan.

- Produktivitas dan keuntungan tinggi (*High production and profit*)

Hasil tanaman yang tinggi dengan keuntungan yang tinggi merupakan salah satu kriteria CEF. Produktivitas tinggi berarti hasil tanaman lebih tinggi dari produksi rata-rata setempat atau lebih tinggi dari rata-rata nasional. Keuntungan yang tinggi akan dapat diraih apabila sistem pertanian/usaha tani yang dijalankan efisien secara finansial. Suatu sistem usaha tani dikatakan efisien apabila *Benefit cost ratio* (BCR) > 1, *Net present value* (NPV) > 0 dan *Internal rate of return* (IRR) > bunga Bank yang berlaku saat itu (IRR > 12 - 17%).

Salah satu contoh teknologi dengan kriteria tersebut adalah usaha tani cabai dengan teknik irigasi gelontor dan bawah permukaan memberikan nilai BCR yang paling tinggi (3,40 dan 2,65), sehingga merupakan usaha tani dengan penggunaan modal yang efisien. Pemberian air irigasi pada saat kehilangan air maksimal 40% air tersedia setinggi 9,6 mm setiap 3 hari dengan teknik irigasi gelontor dan tetes bawah permukaan merupakan teknik irigasi yang berkelanjutan karena dapat diterima petani (*social objective*), layak secara finansial (*economic objective*) dan ramah lingkungan (*ecology objective*) (Haryati 2010).

- Rendah emisi GRK (*Low emission*)

Pertanian mengemisikan GRK dalam jumlah rendah dan menyerap CO₂ serta menyimpan C organik dalam jumlah relatif tinggi. Intensifikasi dalam produksi pangan dan serat merupakan faktor penting yang mempengaruhi emisi GRK. Lebih dari 97% dari suplai makanan dunia diproduksi pada lahan yang mengemisikan GRK, apabila diolah dan dipupuk secara intensif dan atau dijadikan padang gembala (Donald *et al.* 2000).

Proses produksi pertanian mengemisikan 1,4 – 1,7 Gt C atau sekitar 10 – 12% dari total emisi gas rumah kaca antropogenik secara global. Emisi proses produksi pertanian tersebut terdiri atas 0,76 Gt C ekuivalen N₂O dan 0,90 Gt C

ekivalen CH₄ (secara berurutan sebesar 58% dan 47% dari total pengaruh antropogenik) (Smith *et al.* 2007). Pada tahun yang sama, perubahan penggunaan lahan dari hutan menjadi lahan pertanian menyumbang emisi 1,5 Gt C (Canadell 2007). U.S. Environmental Protection Agency (2008) menyimpulkan bahwa komponen utama emisi GRK dari aktivitas pertanian adalah N₂O dari tanah yang berkaitan dengan pemupukan/aplikasi pupuk N (38%), CH₄ dari peternakan (*enteric fermentation*), serta CH₄ dan N₂O dari manajemen pemupukan (38%), CH₄ dari sawah (11%), CH₄ dan N₂O dari pembakaran savana dan hutan serta residu pertanian (13%).

Jenis penggunaan lahan berpengaruh terhadap emisi GRK. Di Instalasi Kebun Percobaan (KP) Jakenan, penggunaan lahan didominasi oleh sawah tadah hujan yang menerapkan pola tanam padi-padi-bera. Berdasarkan luasan penggunaan lahan di KP Jakenan, pola tanam intensif padi-padi-bera memberikan kontribusi emisi gas rumah kaca paling tinggi dibandingkan dengan pola penggunaan lahan lainnya (Tabel 1). Pola tanam padi-padi organik berkontribusi emisi GRK paling rendah yaitu 20 CO₂e t/ha/tahun. Berdasarkan pola penggunaan lahan di (KP) Jakenan, kontribusi emisi GRK tertinggi ditemukan pada lahan yang digunakan untuk kebun rumput yang diikuti kebun mangga dan padi-padi organik dengan fluk masing-masing 9,67; 7,92; dan 4,19 mg CO₂e m²/menit. Pola penggunaan lahan dengan pola tanam padi-padi-jagung atau padi-padi-kacang tanah atau padi-padi-bera menghasilkan fluk GRK relatif sama yaitu 3,94 mg CO₂e m²/menit (21,71 t/ha/tahun CO₂).

Tabel 1. Emisi (Flux CO₂) pada berbagai pola penggunaan lahan di Kebun Percobaan (KP) Jakenan, Kab. Pati, Jawa Tengah

No.	Pola Penggunaan lahan	Luas (m ²)	Flux CO ₂				
			CO ₂ (mg/m ² /min)	CO ₂ (mg/m ² /mnt)	CO ₂ (mg/m ² /mnt)	CO ₂ e (mg/m ² /mnt)	CO ₂ e (t/ha/tahun)
1	Padi-padi organik	1.600	-	0,178	0,28	4,190	20
2	Padi-padi-jagung	7.500	-	0,173	0,36	3,944	22
3	Padi-padi-kc. tanah	10.000	-	-	0,025	3,944	22
4	Padi-padi-bera (kebun*)	2.500	-	-	0,027	3,944	22
5	Padi-padi-bera (karyawan**)	101.250	-	-	0,027	3,944	22
6	Kebun mangga	3.500	7,05	0,001	0,87	7,921	43
7	Kebun rumput	2.500	8,8	0,001	0,87	9,671	42

*) dikelola / dikelola = BRSDLP (2011), *) = dikelola/managemen KP, **) = dikelola oleh karyawan

Hasil pengukuran fluks CO_2 pada beberapa penggunaan lahan di Lampung Timur menunjukkan bahwa emisi pada sistem *agroforestry* hampir sama dengan sistem pertanaman lorong (*alley cropping*), yaitu sekitar 80 t/ha/tahun, atau sekitar 18% lebih tinggi dari emisi CO_2 pada lahan hutan (67,68 t/ha/tahun), sedangkan sistem surjan (jeruk + padi) mengemisikan CO_2 paling rendah (Tabel 2).

Tabel 2. Rata-rata fluks CO_2 dari berbagai jenis penggunaan lahan di Lampung Timur

No.	Jenis Penggunaan Lahan	Fluk CO_2 (t/ha/tahun)
1	Hutan	67,68
2	Agroforestry	80,04
3	Monokultur Ubi Kayu	74,7
4	Pertanaman Lorong	80,06
5	Sistem Surjan (Jeruk + Padi)	23,43

Sumber : BBSOLP (2011)

Fakta-fakta tersebut di atas mengindikasikan bahwa diperlukan solusi agar praktek pertanian yang dilakukan mengemisikan GRK serendah mungkin. Untuk itu, perlu dipahami jenis gas, penyebab, sumber emisi gas serta teknologi mitigasi dan atau adaptasinya. Agar dapat melihat peluang mitigasi, sangat penting untuk memahami bagaimana terjadinya GRK dan apa pengaruhnya akibat adanya GRK tersebut. Dengan demikian perubahan dapat diimplementasikan untuk menurunkan emisi dari sumber yang bervariasi (Tabel 3).

Tabel 3. Jenis gas yang diemisikan, sumber/penyebab emisi dan peluang mitigasinya

Jenis Gas	Sumber/sebab emisi	Peluang Mitigasi
CO_2 (Karbon dioksida)	- Pembakaran bahan bakar fosil (bahan bakar untuk kendaraan dan mesin pertanian, listrik, gas proses agro-kimia) - Perusakan tanah selama pengolahan meningkatkan laju dekomposisi yang melepas CO_2 - Pengrusakan tanah melalui perubahan penggunaan lahan menurunkan sequestrasi C	- Penurunan penggunaan bahan bakar fosil - Pembaharuan energi dalam bidang pertanian - Pengelolaan tanah untuk memperbaiki kualitas dan optimalisasi bahan organik tanah dan sequestrasi C - Optimalisasi pengelolaan hara untuk menurunkan penggunaan pupuk - Penurunan/minimalisasi pengolahan tanah (pengolahan tanah minimum) - Penyediaan <i>carbon sink</i> seperti pengembalaan permanen/padang rumput permanen, hutan kayu dan pagar hijau.
N_2O (Nitrous oksida)	- Produksi pabrik pupuk - Pengeluaran N_2O sebagai hasil dari nitrifikasi ketika residu tanaman ditanam dan terdekomposisi - Penggunaan baik pupuk buatan dan atau pupuk organik - Penusakan tanah	- Pengelolaan hara untuk mengoptimalkan pupuk/ penggunaan pupuk kandang - Pengelolaan tanah untuk menurunkan denitrifikasi dan pencucian - Melindungi penggunaan pupuk kandang dan penyimpanan <i>slurry</i> - Usaha tani presisi untuk target hara - Rotasi tanaman dan penggunaan tanaman penutup (<i>cover crops</i>)
CH_4 (Metana)	- Dikeluarkan secara alami dari sistem digestive dari hewan ruminansia (<i>enteric fermentation</i>) - Dikeluarkan secara alami dari pupuk kandang dan <i>slurry</i>	- Pengelolaan kesehatan ternak untuk optimasi produksi - Seleksi diet ternak yang hati-hati untuk efisiensi pakan optimal - Pengelolaan pupuk kandang dan <i>slurry</i>

Sumber : SAPS (2014)

1. Efisiensi penggunaan air (*Water use efficiency = WUE*)

Salah satu dari sistem pertanian efisien karbon adalah efisiensi penggunaan air. Efisiensi penggunaan air didefinisikan sebagai banyaknya hasil (produksi) tanaman per satuan air yang dipergunakan (Arsyad 2010). Zhang *et al.* (2003) mendefinisikan WUE sebagai rasio hasil tanaman (biasanya hasil yang mempunyai nilai ekonomi) terhadap air yang digunakan untuk berproduksi. Rötter (1977) mengusulkan bahwa dalam kondisi air yang terbatas, biomas

merupakan fungsi dari penggunaan air oleh tanaman ($WU = \text{water used}$) dan efisiensinya ($WUE = \text{water used efficiency}$) adalah yang dikonversi menjadi biomas, berarti efisiensi penggunaan air (WUE) adalah biomas yang dihasilkan per unit penggunaan air.

Keterbatasan air pada suatu tipe agroekosistem tertentu (lahan kering) mengkondisikan agar efisiensi penggunaan air tanaman dapat diraih seoptimal mungkin dengan cara meningkatkan produktivitas tanaman dan meminimalkan kehilangan air melalui evaporasi. Produktivitas aktual lahan kering umumnya lebih rendah dari potensinya. Ketersediaan air seringkali menjadi penyebab hal tersebut di atas. Krishnappa *et al.* (1999) mengemukakan bahwa produktivitas lahan kering merupakan fungsi kelembaban tanah secara spasial dan temporal selama periode pertumbuhan tanaman. Distribusi hujan yang tidak pasti merupakan faktor dominan yang mempengaruhi produktivitas lahan, oleh karena itu, diperlukan upaya khusus berupa pemberian air irigasi. Pemberian irigasi di daerah tropika sering menguntungkan produksi tanaman (Bakker *et al.* 1999; Renault *et al.* 2001).

Pertanian beririgasi merupakan pengguna air terbesar yang jumlahnya di atas 80% dari total penggunaan air, tetapi efisiensi penggunaannya rendah (< 40%) (Pereira *et al.* 2002; Middleton 2005). Di Indonesia, penggunaan air pertanian mencapai 76% (Sosiawan dan Subagyo 2007) bahkan dapat mencapai 80-90% (Partowijoto 2002) dari seluruh penggunaan air. Dalam ruang lingkup global, Indonesia termasuk salah satu negara yang diproyeksikan akan mengalami krisis air pada tahun 2025 (*World Water Forum II* 2000), karena kelemahan dalam pengelolaan air terutama rendahnya efisiensi pemakaian air (Sosiawan dan Subagyo 2007).

Hasil analisis neraca air (Subagyo 2004) di KP Tamanbogo, Lampung Timur, menunjukkan adanya defisit air pada bulan Mei – Oktober dan surplus pada bulan November – April. Petani pada umumnya menanam palawija dari hortikultura bernilai ekonomi tinggi pada musim kemarau, dengan pemberian irigasi suplemen. Praktek pertanian lahan kering seperti ini terbukti meningkatkan pendapatan melalui peningkatan indeks pertanaman dari 100 menjadi 300% (Sutono *et al.* 2001; Soelaeman *et al.* 2001a; Talao'hu *et al.* 2003). Namun pelaksanaan irigasi tersebut belum efisien sehingga terjadi pemborosan sebanyak 10,5 mm/hari (Sutono *et al.* 2001). Secara umum, diperlukan tindakan nyata guna mengurangi penggunaan air irigasi menjadi 60-70% dengan cara menekan kehilangan air dan meningkatkan efisiensi penggunaannya (Partowijoto 2002).

Haryati *et al.* (2010) menunjukkan bahwa pemberian irigasi pada level *management allowable depletion* (MAD) 60% air tersedia (saat kehilangan air maksimal 40% dari air tersedia) setinggi 9,6 mm setiap 3 hari merupakan jenis irigasi (waktu, volume, interval) yang optimal. Irigasi suplemen pada level MAD 60% air tersedia memberikan fluktuasi tegangan air paling rendah (nilai $-0,1$ MPa).

tanah relatif konstan), perubahan cadangan air yang paling tinggi, sehingga memberikan kondisi kelembaban tanah yang paling kondusif bagi pertumbuhan tanaman dan hasil panen cabai yang paling optimal. Irigasi suplemen pada level MAD 60% air tersedia memberikan efisiensi penggunaan air tertinggi sehingga dapat menghemat penggunaan air sebanyak 264 mm per musim tanam.

Teknik irigasi bawah permukaan memberikan efisiensi penggunaan air yang paling tinggi ($0,78 \text{ kg/m}^3$) diikuti oleh teknik irigasi gelontor ($0,73 \text{ kg/m}^3$), curah ($0,62 \text{ kg/m}^3$) dan tetes ($0,60 \text{ kg/m}^3$). Dengan demikian teknik irigasi tetes bawah permukaan dan gelontor merupakan teknik irigasi yang hemat air karena memberikan efisiensi penggunaan air yang lebih tinggi dibandingkan teknik irigasi lainnya. Pemberian mulsa jerami meningkatkan hasil tanaman dan efisiensi penggunaan air pada setiap teknik irigasi kecuali teknik irigasi bawah permukaan. Dengan demikian penggunaan teknik irigasi terutama teknik irigasi gelontor, tetes dan curah sebaiknya dilakukan secara simultan dengan mulsa sisa tanaman (Haryati *et al.* 2011).

Faktor-faktor yang mempengaruhi WUE adalah (Svehlik 1987) :

1. Teknik/metoda irigasi.
2. Persiapan tanah, pengolahan tanah, dan kondisi topografi.
3. Sifat-sifat tanah seperti infiltrasi, tekstur tanah, dan struktur tanah.
4. Kelembaban tanah pada zona perakaran pada saat irigasi diberikan.
5. Iklim dan kondisi meteorologi selama irigasi.
6. Tata letak sistem irigasi : panjang dan jarak *furrow*, *border strips*, jarak, dan rancangan *sprinkler*.
7. Operasi sistem irigasi misalnya posisi *sprinkler* pada saat aplikasi.
8. Dimensi irigasi seperti kedalaman aplikasi, frekuensi irigasi.

Cara untuk memperbaiki WUE melalui tanaman merupakan teknik konservasi air secara luas. Kesuburan tanah yang tinggi, seleksi/pemilihan tanaman, perbaikan varietas, penurunan evaporasi dan manipulasi kultur tanaman meningkatkan produksi tanaman untuk suplai air yang diberikan (Greb 1984). Keberhasilan pertanian di lahan kering terletak pada penggunaan lahan, efisiensi penggunaan air (WUE) dan efisiensi penggunaan hara yang selanjutnya digunakan untuk produksi biomas yang lestari (*sustainable*). Beberapa teknologi untuk memperbaiki WUE adalah (Gupta dan Rajput 1999) konfigurasi lahan (gulud dan bedengan, *border strips*, penterasan, surjan, dan teknik pemanenan), praktik agronomis (cara pengolahan tanah), sistem pertanaman lorong (*strip cropping*), pengendalian gulma, sistem *intercropping*, *strip intercropping*, penggunaan mulsa dan periode penggunaan air. Haryati *et al.* (2003) menyimpulkan bahwa WUE dan hasil tanaman dapat ditingkatkan atau dihindari dengan cara mengurangi jumlah air irigasi pada fase awal fase perkembangan batang atau pada fase pengisian biji tanaman.

gandum. Dengan demikian penurunan jumlah air irigasi pada fase pertumbuhan tertentu tidak menurunkan WUE dan hasil tanaman.

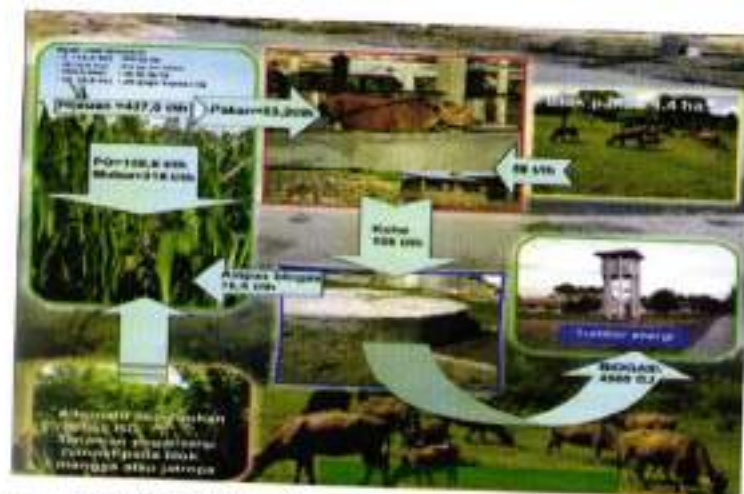
d. Nir limbah (*Zero waste*)

Nir limbah (*zero waste*) merupakan salah satu bentuk CEF. Nir limbah berarti tidak ada limbah yang keluar dari sistem melainkan terus berada di dalam siklus kegiatan usaha tani atau sistem pertanian tersebut. Limbah (*waste*) dan hasil sampingan (*by-product*) dalam suatu sub sistem menjadi input pada sub-sistem yang lain, sehingga *by product* tersebut dapat menjadi nilai tambah bagi sub-sistem yang lain. Demikian seterusnya, sehingga *input-output* di antara sub-sistem tersebut merupakan siklus yang tidak terputus.

Sistem integrasi tanaman – ternak adalah mengintegrasikan seluruh komponen usaha pertanian baik secara horizontal maupun vertikal, sehingga tidak ada limbah yang terbuang (Dwiyanto dan Haryanto 1999). Sistem ini sangat ramah lingkungan dan mampu memperluas sumber pendapatan dan menekan resiko kegagalan (Nitis 1995; Adnyana 2005). Potensi pakan yang berasal dari sisa tanaman semusim (tanaman pangan) adalah jerami padi. Hasil penelitian peningkatan produktivitas padi terpadu (P3T) yang dilakukan dalam periode 2002 – 2004 menunjukkan potensi yang sangat besar dalam pemecahan masalah pakan di tingkat peternak (Haryanto 2009). Pupuk kandang yang merupakan limbah ternak dapat dimanfaatkan sebagai sumber bahan organik tanah. Semua limbah ternak dan pakan dapat diproses secara *in-situ*, untuk menghasilkan gas-bio sebagai energi alternatif. Residu pembuatan gas bio ini, dalam bentuk kompos, merupakan sumber pupuk organik yang sangat dibutuhkan tanaman, sekaligus menjadi pembenah tanah (*soil amendment*) (Haryanto 2009).

Pemanfaatan limbah pertanian hingga tidak ada lagi limbah yang terbuang, akan bermakna melestarikan perputaran unsur hara dari tanah – tanaman – ternak – kembali ke tanah, secara sempurna. Kearifan lingkungan ini perlu ditumbuh-kembangkan secara luas hingga mampu menjaga kelestarian sumber daya alam.

Skenario siklus bahan organik dalam sistem pertanian lahan kering iklim kering (LKIK) sedang dikembangkan di KP. Naibonat. Sistem ini dibuat agar tercapai sistem pengelolaan bahan organik secara *zero waste* (Gambar 1).



Gambar 1. Skenario siklus bahan organik secara *zero waste* yang sedang dikembangkan di Kebun Percobaan Naibonat, Kupang, Nusa Tenggara Timur (Foto: Dariah 2013)

Dari sistem tersebut terlihat bahwa tidak ada limbah pertanian yang keluar dari lingkungan tersebut. Alternatif pemenuhan defisit bahan organik diperoleh dari tanaman pagar/strip dan rumput pada blok mangga/jatropha yang dikembalikan sebagai mulsa bersama-sama dengan pupuk organik (PO) ke tanah sebagai input untuk blok tanaman semusim. Hasil hijauan (*by product*) dari blok tanaman semusim dan rumput pakan dari blok pakan diberikan ke ternak sebagai sumber pakan ternak. Kotoran hewan (kohe) yang dihasilkan ternak disalurkan ke pemroses biogas yang akan menghasilkan biogas sebagai sumber energi dan ampas biogas. Ampas biogas berupa *sludge* dan *slurry* diberikan ke tanah pada blok tanaman semusim. Demikian seterusnya sehingga tidak ada limbah yang terbuang dan keluar dari sistem tersebut melainkan terus berada di lingkungannya (Gambar 1).

e. Aliran permukaan rendah (*clean run-off*)

Clean run-off merupakan penciri lainnya praktek CEF, artinya jumlah air yang hilang dan tidak dimanfaatkan harus ditekan seminimal mungkin, sehingga sumber daya air dapat dimanfaatkan secara optimal untuk proses produksi tanaman. Penurunan aliran permukaan juga bisa berdampak langsung terhadap berkurangnya resiko erosi yang tidak terkendali, sehingga erosi tidak lagi menjadi penyebab utama degradasi sumber daya lahan selain itu resiko banjir dan pencemaran di daerah hilir juga bisa ditekan (Dariah 2013).

Pengendalian aliran permukaan merupakan salah satu strategi konservasi air. Gupta and Rajput (1999) mengemukakan bahwa strategi konservasi air

adalah upaya peningkatan cadangan air di zona perakaran tanaman yang dapat dilakukan melalui pengendalian aliran permukaan dan peningkatan infiltrasi, pemanenan air dan mengurangi evaporasi dari tanah dengan mulsa. Secara teknis, konservasi air dapat dilakukan melalui pengendalian evaporasi, transpirasi, dan aliran permukaan (Arsyad 2010). Salah satu aspek yang sering diabaikan dalam konservasi air adalah pengendalian evaporasi (Nicholaichuk *et al.* 1978 dalam Noeralam 2002).

Menurut Scholes *et al.* (1997), pemberian bahan organik pada permukaan tanah dapat meningkatkan infiltrasi dan menurunkan evaporasi dari permukaan tanah. Pemberian pupuk kandang 20 t/ha dapat meningkatkan air tersedia 7,35 – 43,60 % (Tala'uhu *et al.* 1989). Selain itu, bahan organik mampu menyerap cairan sebanyak 200 % dari berat keringnya (Scholes *et al.* 1997). Bahan organik dalam tanah dapat meningkatkan kemampuan tanah menahan air melalui pengikatan molekul-molekul air lewat gugus-gugus fungsionalnya dan pengisian pori-pori mikro tanah akibat agregasi yang lebih baik (Stevenson 1994). Hal ini telah dibuktikan pada berbagai penelitian bahwa tanah-tanah dengan kandungan bahan organik yang lebih tinggi akan memiliki kemampuan memegang air yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah-tanah yang kandungan bahan organiknya lebih rendah (Sukmana *et al.* 1985; Erfandi *et al.* 1993).

Kemampuan tanah menahan air dapat bervariasi antara satu tempat dengan tempat lainnya, yang salah satunya disebabkan oleh kandungan bahan organik yang berbeda. Demikian juga pemberian bahan organik ke dalam tanah untuk peningkatan kemampuan menahan air sangat ditentukan oleh takaran dan macam bahan organik yang diaplikasikan. Dari hasil penelitiannya di Kali Gesik, Jawa Tengah pada tanah berskeletol vulkanik, Sukmana *et al.* (1986) melaporkan bahwa tanah yang diberi bahan organik dari opo-opo (Jawa)/hahapaan (Sunda) atau *Flemingia congesta* mampu menahan air hingga 5–6% lebih tinggi (dibandingkan dengan kondisi tanah sebelum penanaman) setelah 14 tahun penanaman legum tersebut. Sementara itu, vegetasi alami hanya mampu meningkatkan kandungan air tanah 2% dari kondisi tanah tanpa vegetasi. Dari hasil penelitian di Kuamang Kuning-Jambi dan Ketahun-Bengkulu, Erfandi *et al.* (1993) melaporkan bahwa hijauan mukuna mampu meningkatkan kadar air tersedia (kemampuan menahan air), dan umumnya makin lama umur mukuna, makin besar kontribusinya dalam menahan air (Tabel 4).

Pengelolaan kelembaban tanah pada zona perakaran dapat juga dilakukan dengan pemberian mulsa. Pemberian mulsa sebanyak 15 t/ha sebagai sumber bahan organik tanah dapat meningkatkan kadar air tanah jauh lebih tinggi dibandingkan tanah yang tidak diberi mulsa (Dariah dan Rachman 1989; Agus *et al.* 1999). Pada percobaan lapang, Lal *et al.* (1980) membuktikan bahwa pemberian mulsa meningkatkan permeabilitas menjadi 3 – 4 kali lebih besar dibandingkan tanpa mulsa. Mulsa dapat menurunkan evaporasi, menurunkan suhu dan gradien kadar air dalam tanah, serta menunjang aktivitas mikrobia di

zona perakaran. Pengolahan tanah dangkal dengan mulsa pada permukaan tanah dapat mengkonservasi air terutama pada permukaan tanah (Gupta dan Rajput 1999). Sharma dan Gupta (1990 dalam Gupta dan Rajput 1999), aplikasi mulsa pada tanah hitam dapat menahan air 40 mm lebih besar dibandingkan tanpa mulsa pada 140 cm profil tanah tanpa tanaman. Efektivitas mulsa semakin meningkat dengan ketebalannya. Selanjutnya Hazare *et al.* (1973) dalam Gupta dan Rajput (1999) melaporkan bahwa mulsa mengkonservasi 47 % lebih banyak dari kelembaban tanah dibandingkan tanpa mulsa pada lahan tadah hujan. Penggunaan sisa-sisa tanaman 6 ton/ha sebagai mulsa pada lahan dengan kemiringan 8 – 15 % dapat mengurangi erosi 80 – 90 % dan mengurangi aliran permukaan 60 – 70 % (Suwardjo 1981). Pemberian mulsa dengan ketebalan lapisan mulsa 100 g/m² dapat menyerap kurang dari 0,2 mm air hujan per kejadian hujan (Scholes *et al.* 1997). Pemberian jerami gandum secara konvensional selama lahan bera dapat menurunkan evaporasi 15 % (Gardner 1969 dalam Gardner 1972).

Tabel 4. Pengaruh hijauan mucuna terhadap kemampuan tanah menahan air (air tersedia)

Perlakuan	Pori air tersedia
	% vol
Kuamang Kuning- Jambi (1991/1992)	
sebelum ditanam mukuna	10,5
setelah ditanam mukuna	11,2
Ketahun-Bengkulu (1990/1991)	
kontrol	6,1
2 bulan setelah tanam	10,4
4 bulan setelah tanam	12,6
5,5 bulan setelah tanam	12,7
Sumber: Erfandi <i>et al.</i> (1993) dimodifikasi	

Selain penggunaan mulsa secara konvensional dapat pula menggunakan mulsa vertikal. Mulsa vertikal adalah penggunaan bahan mulsa dengan cara ditanamkan pada parit-parit yang dirancang mengikuti kontur. Mulsa vertikal dapat menahan aliran permukaan 67 – 82 % dan mengurangi erosi 92 – 95 % dibanding mulsa konvensional (Brata 1995a).

Penerapan teknologi panen air merupakan prasyarat dapat diterapkannya *strip and run off*. Beberapa teknologi panen air seperti embung, kedung, atau parit bisa dijadikan alternatif teknologi panen air (Subagyo *et al.* 2004, Agus *et al.* 2005; Kartiwa dan Dariah 2012). Jika dilengkapi dengan sistem penyaliran air, maka peluang untuk meningkatkan IP (indeks pertanian) cukup lebih terbuka. Aplikasi teknologi hemat air misalnya dengan

memanfaatkan mulsa, menjadikan peluang peningkatan IP menjadi lebih besar lagi.

Selain dilakukan dengan menerapkan teknologi panen air, *clean run-off* juga bisa dicapai dengan meningkatkan kesempatan air untuk meresap dan tersimpan dalam tanah. Peluang air untuk meresap ke dalam tanah menjadi lebih tinggi jika air yang mengalir di atas permukaan tanah mempunyai kecepatan yang relatif rendah. Tindakan konservasi baik mekanik maupun vegetatif salah satunya berfungsi untuk memperlambat laju aliran permukaan, sehingga selain daya rusaknya menurun, kesempatan air untuk meresap ke dalam tanah juga menjadi lebih tinggi. Beberapa hasil penelitian menunjukkan fungsi teknologi konservasi tanah dalam menurunkan besarnya aliran permukaan (Haryati *et al.* 1995; Adimiharja dan Sutono 2005; Dariah *et al.* 2004).

Integrasi Tanaman – Ternak Merupakan Sistem Pertanian Nir Limbah dan Efisien Karbon

Integrasi Tanaman – Ternak

Pengembangan sistem pertanian tanaman pangan (padi-palawija) yang diintegrasikan dengan ternak dalam sistem CEF selain meningkatkan ketahanan pangan dan pendapatan, juga akan menurunkan emisi GRK dan meningkatkan kualitas lingkungan. Budidaya tanaman pangan ditujukan untuk memenuhi kebutuhan pangan keluarga, sedangkan ternak (sapi) diperuntukkan sebagai sumber tenaga kerja dan pendapatan. Integrasi ternak dan tanaman pangan akan menghasilkan: (a) pupuk organik dan pembenah tanah berupa kompos kotoran hewan dan sisa tanaman; (b) bahan bakar terbarukan berupa biogas, biochar, dan bahan bakar padat lainnya; dan (c) penurunan emisi GRK melalui pengurangan penggunaan pupuk anorganik dan *fossil fuel* tingkat rumah tangga.

Dalam sistem pertanian efisien karbon berbasis padi/palawija dan ternak, integrasi antara komponen tanaman dan ternak sangatlah erat. Pemanfaatan limbah tanaman sebagai pakan dan limbah ternak menjadi pupuk, serta sumber energi alternatif merupakan komponen utama dalam siklus karbon yang ideal.

Potensi limbah tanaman pangan merupakan sumber daya pakan berserat yang sangat diperlukan dan sesuai untuk ternak sapi dan ruminansia lainnya. Di banyak daerah, limbah pertanian tanaman pangan seperti jerami padi, belum dimanfaatkan sebagai sumber pakan ternak. Petani cenderung membakarnya yang berarti membuang bahan organik yang berpotensi menjadi pakan ternak. Pada umumnya lahan pertanian di Indonesia mempunyai kadar bahan organik yang rendah yaitu <2%, sehingga pengembalian sisa panen menjadi salah satu alternatif yang paling mudah dan murah untuk meningkatkan kadar C-organik tanah. Produksi limbah pertanian di lahan kering maupun lahan sawah cukup tinggi. Pertanian lahan sawah mempunyai potensi penyedia jerami yang cukup

tinggi. Luas panen padi sawah irigasi di Indonesia sekitar 12 juta ha setiap tahun, sehingga ada potensi penyediaan jerami padi sebesar 48 juta t/tahun (Haryanto 2009). Disamping jerami padi, masih tersedia jerami jagung dan sisa tanaman kedelai, kacang tanah, kacang hijau maupun ubi jalar, dan ubi kayu. Data tahun 2006 menunjukkan luas panen jagung mencapai 3,8 juta ha, kedelai 0,68 juta ha, kacang tanah 0,71 juta ha, kacang hijau 0,33 juta ha, ubi kayu 1,16 juta ha, dan ubi jalar 0,17 juta ha (BPS 2006).

Limbah tanaman pangan tersebut dapat menyediakan sekitar 86 juta ton bahan kering (Bamuelim *et al.* 2008), atau setara dengan sekitar 60 juta ton bahan pakan berserat yang berpotensi untuk dijadikan pakan ternak. Sementara kebutuhan pakan berserat seekor sapi dewasa sekitar 20 kg/hari, atau setara dengan 7 t/tahun. Oleh karena itu, potensi limbah tanaman padi saja seyogyanya mampu mendukung kebutuhan pakan berserat untuk sekitar 7 juta ekor sapi dewasa sepanjang tahun. Jumlah tersebut setara dengan aset senilai Rp 35 triliun, dengan asumsi harga sapi dewasa Rp 5 juta/ekor (Haryanto 2009).

Integrasi antara usaha tani tanaman pangan, peternakan, perikanan, serta dilengkapi dengan pemanfaatan potensi limbah industri agro yang dapat digunakan sebagai sumber pakan ternak, akan menjadi alternatif pola usaha tani yang dapat dikembangkan di masa datang (Dwiyanto dan Haryanto 1999). Berdasarkan hal tersebut, pendekatan *food - feed system* pada setiap kawasan usaha tani, perlu mendapatkan perhatian agar potensi sumber daya alam yang ada dapat dimanfaatkan secara optimal (Haryanto 2009).

Program peningkatan produktivitas padi terpadu yang dilaksanakan pemerintah sejak tahun 2002, telah memasukkan pendekatan integrasi antara tanaman padi dengan ternak sapi. Dari sistem tersebut dapat dikembangkan suatu keterkaitan dimana tanaman padi menghasilkan jerami padi yang dapat menghasilkan pupuk organik yang diperlukan untuk mempertahankan kesuburan lahan persawahan (Haryanto *et al.* 2003).

Menurut Haryanto (2009) sistem integrasi tanaman – ternak – *zero waste* (SITT-ZW) merupakan strategi usaha tani yang harus mampu: (1) memenuhi permintaan dan kebutuhan pasar; (2) memperkuat dan memperluas sumber pendapatan rumah tangga tani; (3) menekan resiko kegagalan dalam mengembangkan usaha; (4) memanfaatkan hubungan sinergis antara tanaman dan ternak; (5) menyediakan bio-energi pada tingkat rumah tangga dalam bentuk biogas; dan (6) tidak mencemari lingkungan.

Selanjutnya Haryanto (2009) juga mengemukakan bahwa *roadmap* pengembangan SITT-ZW kedepan meliputi empat pilar keterkaitan: (1) keterkaitan lembaga yang merupakan pilar utama; (2) keterkaitan horizontal atau bentuk diversifikasi usaha pada tingkat usaha tani dengan mengintegrasikan tanaman ternak yang dikelola tanpa limbah; (3) keterkaitan vertikal yang mampu menciptakan nilai tambah dalam pola pengembangan agro-bisnis dan agro-industri; dan (4) keterkaitan regional dengan memanfaatkan

memanfaatkan mulsa, menjadikan peluang peningkatan IP menjadi lebih besar lagi.

Selain dilakukan dengan menerapkan teknologi panen air, *clean run-off* juga bisa dicapai dengan meningkatkan kesempatan air untuk meresap dan tersimpan dalam tanah. Peluang air untuk meresap ke dalam tanah menjadi lebih tinggi jika air yang mengalir di atas permukaan tanah mempunyai kecepatan yang relatif rendah. Tindakan konservasi baik mekanik maupun vegetatif salah satunya berfungsi untuk memperlambat laju-aliran permukaan, sehingga selain daya rusaknya menurun, kesempatan air untuk meresap ke dalam tanah juga menjadi lebih tinggi. Beberapa hasil penelitian menunjukkan fungsi teknologi konservasi tanah dalam menurunkan besarnya aliran permukaan (Haryati *et al.* 1995; Adimiharja dan Sutono 2005; Dariah *et al.* 2004).

Integrasi Tanaman – Ternak Merupakan Sistem Pertanian Nir Limbah dan Efisien Karbon

Integrasi Tanaman - Ternak

Pengembangan sistem pertanian tanaman pangan (padi-palawija) yang diintegrasikan dengan ternak dalam sistem CEF selain meningkatkan ketahanan pangan dan pendapatan, juga akan menurunkan emisi GRK dan meningkatkan kualitas lingkungan. Budidaya tanaman pangan ditujukan untuk memenuhi kebutuhan pangan keluarga, sedangkan ternak (sapi) diperuntukkan sebagai sumber tenaga kerja dan pendapatan. Integrasi ternak dan tanaman pangan akan menghasilkan: (a) pupuk organik dan pembenah tanah berupa kompos kotoran hewan dan sisa tanaman; (b) bahan bakar terbarukan berupa biogas, biochar, dan bahan bakar padat lainnya; dan (c) penurunan emisi GRK melalui pengurangan penggunaan pupuk anorganik dan *fossil fuel* tingkat rumah tangga.

Dalam sistem pertanian efisien karbon berbasis padi/palawija dan ternak, integrasi antara komponen tanaman dan ternak sangatlah erat. Pemanfaatan limbah tanaman sebagai pakan dan limbah ternak menjadi pupuk, serta sumber energi alternatif merupakan komponen utama dalam siklus karbon yang ideal.

Potensi limbah tanaman pangan merupakan sumber daya pakan berserat yang sangat diperlukan dan sesuai untuk ternak sapi dan ruminansia lainnya. Di banyak daerah, limbah pertanian tanaman pangan seperti jerami padi, belum dimanfaatkan sebagai sumber pakan ternak. Petani cenderung membakarnya yang berarti membuang bahan organik yang berpotensi menjadi pakan ternak. Pada umumnya lahan pertanian di Indonesia mempunyai kadar bahan organik yang rendah yaitu <2%, sehingga pengembalian sisa panen menjadi salah satu alternatif yang paling mudah dan murah untuk meningkatkan kadar C-organik tanah. Produksi limbah pertanian di lahan kering maupun lahan sawah relatif tinggi. Pertanian lahan sawah mempunyai potensi penyedia jerami yang cukup

tinggi. Luas panen padi sawah irigasi di Indonesia sekitar 12 juta ha setiap tahun, sehingga ada potensi penyediaan jerami padi sebesar 48 juta t/tahun (Haryanto 2009). Disamping jerami padi, masih tersedia jerami jagung dan sisa tanaman kedelai, kacang tanah, kacang hijau maupun ubi jalar, dan ubi kayu. Data tahun 2006 menunjukkan luas panen jagung mencapai 3,8 juta ha, kedelai 0,68 juta ha, kacang tanah 0,71 juta ha, kacang hijau 0,33 juta ha, ubi kayu 1,16 juta ha, dan ubi jalar 0,17 juta ha (BPS 2006).

Limbah tanaman pangan tersebut dapat menyediakan sekitar 86 juta ton bahan kering (Bamualim *et al.* 2008), atau setara dengan sekitar 60 juta ton bahan pakan berserat yang berpotensi untuk dijadikan pakan ternak. Sementara kebutuhan pakan berserat seekor sapi dewasa sekitar 20 kg/hari, atau setara dengan 7 t/tahun. Oleh karena itu, potensi limbah tanaman padi saja seiyogyanya mampu mendukung kebutuhan pakan berserat untuk sekitar 7 juta ekor sapi dewasa sepanjang tahun. Jumlah tersebut setara dengan aset senilai Rp 35 triliun, dengan asumsi harga sapi dewasa Rp 5 juta/ekor (Haryanto 2009).

Integrasi antara usaha tani tanaman pangan, peternakan, perikanan, serta dilengkapi dengan pemanfaatan potensi limbah industri agro yang dapat digunakan sebagai sumber pakan ternak, akan menjadi alternatif pola usaha tani yang dapat dikembangkan di masa datang (Dwiyanto dan Haryanto 1999). Berdasarkan hal tersebut, pendekatan *food - feed system* pada setiap kawasan usaha tani, perlu mendapatkan perhatian agar potensi sumber daya alam yang ada dapat dimanfaatkan secara optimal (Haryanto 2009).

Program peningkatan produktivitas padi terpadu yang dilaksanakan pemerintah sejak tahun 2002, telah memasukkan pendekatan integrasi antara tanaman padi dengan ternak sapi. Dari sistem tersebut dapat dikembangkan suatu keterkaitan dimana tanaman padi menghasilkan jerami padi yang dapat menghasilkan pupuk organik yang diperlukan untuk mempertahankan kesuburan lahan persawahan (Haryanto *et al.* 2003).

Menurut Haryanto (2009) sistem integrasi tanaman – ternak – *zero waste* (SITT-ZW) merupakan strategi usaha tani yang harus mampu: (1) memenuhi permintaan dan kebutuhan pasar; (2) memperkuat dan memperluas sumber pendapatan rumah tangga tani; (3) menekan resiko kegagalan dalam mengembangkan usaha; (4) memanfaatkan hubungan sinergis antara tanaman dan ternak; (5) menyediakan bio-energi pada tingkat rumah tangga dalam bentuk biogas; dan (6) tidak mencemari lingkungan.

Selanjutnya Haryanto (2009) juga mengemukakan bahwa *roadmap* pengembangan SITT-ZW kedepan meliputi empat pilar keterkaitan: (1) keterkaitan lembaga yang merupakan pilar utama; (2) keterkaitan horizontal antar bentuk diversifikasi usaha pada tingkat usaha tani dengan mengintegrasikan tanaman ternak yang dikelola tanpa limbah; (3) keterkaitan vertikal yang mampu menciptakan nilai tambah dalam pola pengembangan agro-pasar dan agro-industri; dan (4) keterkaitan regional dengan memanfaatkan

keunggulan komparatif dan kompetitif melalui pewilayahan komoditas dan cabang usaha yang berdaya saing tinggi dalam era pasar bebas.

Beberapa Analisis dalam CEF

Pengembangan sistem dinamik model CEF yang memanfaatkan *product dan by product* secara optimal dan terintegrasi harus didukung oleh a) siklus dan neraca karbon/gas rumah kaca, b) siklus *product dan by product*, c) siklus dan neraca energi, d) siklus dan neraca hara tanaman, dan e) analisis dan kelayakan ekonomi (Haryono dan Las 2014).

Pengamatan intensif berguna untuk menghimpun data kuantitatif yang diperlukan dalam sistem dinamik model CEF. Analisis sistem dinamik model CEF akan mempertimbangkan: 1) siklus produk dan produk samping (*by product*); 2) siklus dan neraca energi; 3) siklus dan neraca hara tanaman; 4) siklus dan neraca bahan organik/GRK; 5) siklus dan neraca air; dan 6) analisis finansial (BBSDL 2011).

- a. Siklus produk dan produk samping
 - Produk: beras, pipilan, umbi, benih, daging sapi, *legume*, biogas (satuan/luasan/musim)
 - Produk samping: jerami, brangkasan, sekam, dedak, kohe, *sludge*, dan *slurry* (satuan/luasan/musim)
- b. Siklus dan neraca energi
 - *Supply*: sekam, dedak, kohe (t gas/satuan/musim)
 - *Demand*: perumahan dan perkantoran (t/satuan/hari)
 - *Breeds and feed comparison for low carbon emission* (temak)
- c. Siklus dan neraca hara tanaman

Analisis neraca hara dilakukan untuk memperhitungkan ketersediaan hara secara internal dan memprediksi jumlah hara yang dibutuhkan untuk usaha tani secara keseluruhan. Perhitungan neraca hara ditujukan untuk menekan penggunaan pupuk anorganik dan memanfaatkan seoptimal mungkin sumber hara internal melalui konsep *zero waste*. Parameter yang diamati meliputi :

 - Penggunaan pupuk anorganik dan organik (suplai hara)
 - Kadar hara tanaman, biomas (akar, batang, jerami), *sludge*, *slurry*, kohe
- d. Siklus dan neraca bahan organik/GRK (*emisi, carbon sink/footprint*)

Analisis bahan organik dilakukan untuk menilai kebutuhan bahan organik untuk pakan, mulsa dan pupuk organik sehingga tercipta *zero waste*, sedangkan analisis emisi untuk menilai jumlah karbon yang hilang melalui emisi GRK. Parameter yang diamati meliputi:

 - Sumber karbon: tanaman, sekam, gabah, legum, dan *sludge*
 - Emisi GRK secara periodik dari tanah, tanaman, dan kohe, temak

- Karbon tanah: C-organik tanah
- e. Siklus dan neraca air

Analisis neraca air dilakukan untuk memprediksi ketersediaan dan kebutuhan air untuk tanaman dengan sistem *intermittent* sepanjang tahun sehingga air secara keseluruhan dapat dimanfaatkan dan tercipta kondisi *zero run off (clean run-off)*. Kegiatan yang dilakukan adalah: menghitung ketersediaan/neraca air untuk pengairan (mendukung sistem *intermittent*) di lahan sawah. Di lahan kering analisis neraca air dilakukan untuk menentukan jadwal dan volume irigasi suplemen yang diimplementasikan sesuai dengan kebutuhan air tanaman.
 - f. Analisis finansial : analisis input – output usaha tani

Rancang Bangun CEF/CEF-Model

Implementasi (operasional) model CEF pada skala terbatas (15-20 ha) berbasis padi/palawija dan ternak, mencakup berbagai aspek yaitu (1) agronomi dan air; pengolahan tanah dan pengelolaan air; (2) ternak: pemeliharaan/pengelolaan, ransum ternak, dll; (3) pengembangan dan pengelolaan biogas; (4) pengelolaan hara dan pupuk (organik dan anorganik) serta pengomposan; dan (5) pengembangan dan pengelolaan panen.

Rancang bangun pilot plan sistem pertanian efisien karbon (CEF) berbasis padi/palawija-ternak di KP Jakenan dan KP Taman Bogo disusun berdasarkan kondisi agroekosistem dan sumber daya alam yang ada di masing-masing wilayah serta berdasarkan peluang perbaikan yang mungkin atau paling optimal dapat dilakukan di masing-masing lokasi.

Terdapat perbedaan rancang bangun pilot plan di KP Tamanbogo dan KP Jakenan diantaranya dalam hal sistem pengairan, jumlah dan proporsi ternak sapi antara penggemukan dan pembibitan, ukuran rumah pakan dan kandang sapi, serta instalasi biogas dalam hal penampung biogas (Tabel 5). Perbedaan rancang bangun tersebut selain disebabkan oleh adanya perbedaan sumber daya alam juga karena melengkapi dan atau memperbaiki apa yang sudah ada di masing-masing lokasi.

Pilot plan sistem pertanian efisien karbon (*Indonesian carbon efficient farming = ICEF*) di KP Jakenan diwujudkan dengan :

1. Menambah lahan produktif dari 12,825 ha menjadi 13,850 ha (penambahan 0,70 ha lahan surjan dan kebun rumput serta legumnosa sebanyak 0,325 ha) dengan budidaya yang optimal,
2. Menambah ternak dari 5 ekor (penggemukan) menjadi 13 ekor (6 ekor penggemukan, 7 ekor pembibitan), dengan siklus energi dan pemanfaatan kohe yang efisien,

- pemanfaatan *by product* yang optimal (tidak ada yang diangkut keluar), menanam glirisida sebanyak 3135 pohon dan menambah pertanaman rumput raja seluas 3500 m² sehingga dapat memenuhi kebutuhan pakan sebanyak 20 ekor sapi dan tercipta *zero waste*,
- menambah satu buah embung dengan kapasitas tampung ± 20.000 m³ dan aplikasi sistem pengairan *intermittent* pada saat musim kemarau.

Tabel 1. Rincian tentang sistem pertanian efisien karbon (CEF) berbasis padi/palawija-ternak di Kebun Percobaan KP Taman Bogo dan KP Jakenan

No	Uraian	KP Taman Bogo	KP Jakenan
<i>Agronomi dan Ag: Pengolahan tanah dan pengelolaan air</i>			
1	Pola tanam	Lahan sawah: Padi-padi-palawija Padi-Palawija Lahan kering: Palawija-palawija Padi gogo-Palawija	Lahan sawah: Padi-padi-palawija Lahan kering: Palawija-palawija
2	Sistem Pengairan	Lahan sawah: Tergenang dan Intermitten Lahan Kering: Gelontor dan Curah, sumber tenaga motor/ <i>Big gun</i>	Lahan sawah: Tergenang dan Intermitten Lahan Kering: Gelontor, sumber tenaga Kincir Angin
3	Pengolahan tanah	Lahan Sawah : OTS dan TOT Lahan Kering: OTK	Lahan Sawah : OTS dan TOT Lahan Kering: OTK
4	Varietas Padi Palawija	Lahan Sawah: Inpari 1, 8 dan 13 Lahan Kering : Inpago 4, dan 8 Jagung, kedelai, kacang hijau, ubi kayu	Lahan Sawah: Inpari 1, 6, 13 Lahan Kering : Jagung, kacang tanah, kacang hijau, kedelai
<i>Pengelolaan hara dan pupuk (organik & an-organik) & pengomposan</i>			
5	Penggunaan pupuk	Pupuk kandang, kompos, jerami serta N, P, K, dan Phoska berdasarkan status hara tanah	Pupuk kandang, kompos, jerami serta N, P K, dan Phoska berdasarkan status hara tanah
<i>Ternak: Pemeliharaan/pengelolaan, ransum ternak, dll.</i>			
6	Ternak sapi	Penggemukan 14 ekor, Pembibitan 6 ekor	Penggemukan 5 ekor, Pembibitan 8 ekor

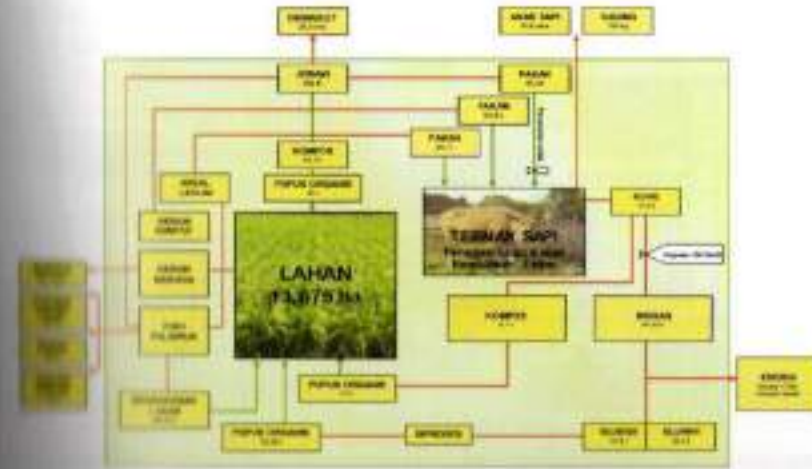
7	Pakan	Rumput: R. Galah, King Grass, dan Brangkasian Palawija, Jecami, Legum: Girsidia, Konsentrat	6 m x 9 m 15 m x 7 m, 2 unit	Fermentator Kohe: ukuran 9 m ³ Penampung Sludge: 16 m ³ Lantai jemur Sludge: 10 m ² Jaringan distribusi biogas	1 unit
		Rumput: Setaria, R. Gajah, dan King Grass, Bracharia, Panicum, Jerami, Legum: Girsidia, Kalandra Lamtorogung, Brangkasian palawija Konsentrat	6 m x 4 m 15 m x 7 m	Fermentator Kohe: ukuran 10 m ³ Penampung Sludge: 30 m ³ Lantai jemur Sludge: 15 m ² Penampung biogas: 6 m ³ Jaringan distribusi biogas	1 unit
8	Rumah pakan				
9	Kandang sapi				
10	Pengembangan dan pengolahan biogas Isolasi Biogas dan kompos				
11	Alat Pemecah Rumput (Chopper)				

Sumber: BBSDL (2011)

Diagram alir pilot plan sistem CEF berbasis padi/palawija-ternak sapi di KP Jakenan, Pati, Jawa Tengah disajikan pada Gambar 2. komponen utama yang membangun sistem CEF di KP Jakenan, Pati terdiri atas Lahan seluas 13, 675 ha yang terdiri atas areal pertanaman leguminosa, kebun rumput, kebun mangga, sawah (padi, palawija), dan ternak sapi sebanyak 13 ekor. Lahan pertanian seluas 13, 675 ha menghasilkan produk berupa padi, jagung, kacang tanah, mangga, dan pakan ternak serta *by product* berupa jerami yang sebagian diberikan ke ternak sebagai pakan dan sebagian diangkut keluar (dijual). Brangkasian tanaman berupa akar dan sisa tanaman dikembalikan ke tanah bersama-sama dengan pengolahan tanah. Selain itu, lahan tersebut mendapat suplai berupa pupuk anorganik dan organik yang berasal dari pupuk kandang dan sisa pengolahan biogas (*sludge dan slurry*).

Komponen ternak dalam sistem CEF di KP Jakenan, selain menghasilkan anak dan daging sapi, juga menghasilkan kohe yang sebagian dikembalikan ke tanah sebagai pupuk kandang, sebagian diolah menjadi biogas sebagai sumber energi untuk keperluan rumah tangga. Sisa pengolahan biogas berupa *sludge dan slurry* dikembalikan ke tanah sebagai sumber pupuk organik.

Penerapan sistem CEF di KP Jakenan, meningkatkan produktivitas tanaman 25 – 100 %, produk samping/*by product* ± 50 %, daging sapi setara 10,5 anak sapi, menurunkan emisi GRK, meningkatkan efisiensi pemupukan, dan efisiensi penggunaan air 50 – 200 %.



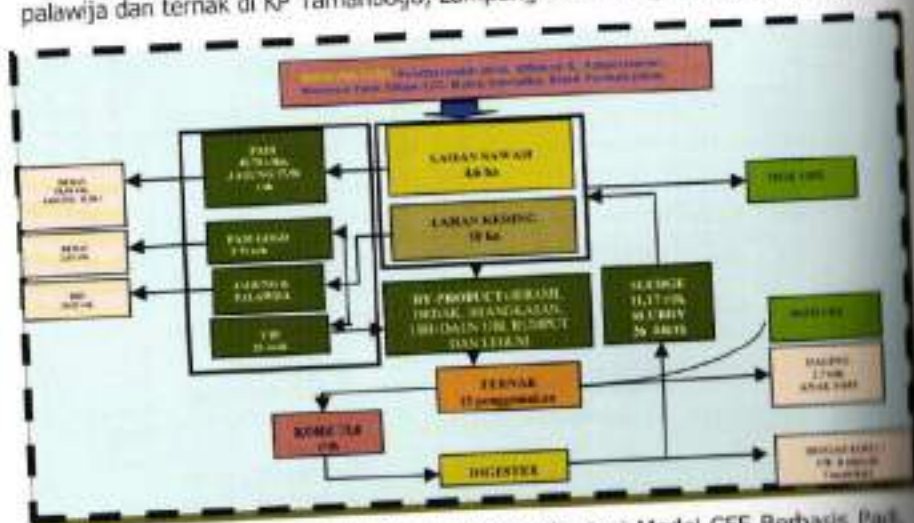
Gambar 2. Diagram alir pilot plan sistem CEF berbasis padi/palawija-ternak sapi di Kebun Percobaan (KP) Jakenan, Pati, Jawa Tengah (BBSDL 2011)

Pilot plan sistem pertanian efisien karbon (*Indonesian carbon efficient farming = ICEF*) di KP Tamanbogo diwujudkan dengan :

- mengelola lahan produktif seluas 14,6 ha (lahan kering 4,6 ha dan lahan sawah 10 ha dengan 2 kali musim tanam padi dan jagung) dengan budidaya yang optimal,
- menambah ternak dari 5 ekor (penggemukan) menjadi 20 ekor (5 ekor penggemukan dan 15 ekor pembibitan), dengan siklus energi dan pemanfaatan kohe yang efisien,
- pemanfaatan *by product* yang optimal, mengelola rumput lapang 0,93 ha, menanam glirisidia sebanyak 10.000 pohon dan menambah pertanaman rumput setaria seluas 0,2 ha dan *Panicum sp* sebanyak 20.000 rumpun sehingga tercipta *zero waste*,
- memperdalam dan melapisi dasar embung serta aplikasi sistem pengairan bawah permukaan (*sub-surface irrigation*) yang diterapkan pada areal lahan kering intensif.

Penerapan sistem ICEF di KP Tamanbogo, meningkatkan produktivitas tanaman 60 – 100 %, produk samping/*by product* 60 – 100 %, ternak %, menurunkan emisi GRK, meningkatkan efisiensi pemupukan, dan efisiensi penggunaan air 50 – 100 %.

Diagram alir *Pilot Plan* Sistem Usaha tani Model CEF berbasis padi, palawija dan ternak di KP Tamanbogo, Lampung Timur disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir *Pilot Plan* Sistem Usaha tani Model CEF Berbasis Padi, Palawija dan Ternak di Kebun Percobaan Tamanbogo, Lampung Timur (BBSLP 2011)

Penutup

Sistem pertanian efisien karbon (CEF) adalah model/sistem pertanian yang menganut prinsip *Green Development/Green Economy* yang perlu dikembangkan ke wilayah/areal yang lebih luas. Diperlukan penelitian yang lebih komprehensif dalam skala yang lebih luas untuk mengidentifikasi dan mengetahui beberapa parameter ekonomi, lingkungan, dan emisi GRK, serta tingkat efisiensi energi dalam penerapannya yang bersifat *insitu*.

Tahapan untuk mengimplementasikan sistem pertanian efisien karbon adalah mengidentifikasi area dari sistem yang dapat diperbaiki baik dalam hal emisi maupun efisiensi energinya. Salah satu cara untuk melakukan hal ini adalah melakukan perhitungan karbon *footprint* dari sistem pertanian. Ini akan menghitung emisi dari seluruh sistem pertanian dan area-area tertentu dimana emisinya tinggi. Tahapan berikut dapat dimulai dengan penurunan emisi dari sistem usaha tani yang akan dilakukan.

Integrasi tanaman – ternak merupakan salah satu sistem pertanian nir limbah dan efisien karbon yang dapat diterapkan pada skala ekonomi yang lebih luas. Sistem ini memerlukan modal yang lebih tinggi, sehingga diperlukan bantuan pemerintah dalam bentuk subsidi terutama dalam hal pengadaan ternak dan implementasi alat pengolahan biogas.

Daftar Pustaka

- Adlimihardja, A. dan S. Sutono. 2005. Teknologi pengendalian erosi lahan berlereng. Hal. 103-145. *dalam* Teknologi Pengelolaan Lahan Kering: Menuju Pertanian Produktif dan Ramah Lingkungan. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Ariyana, M.O. 2005. Pengembangan system integrasi tanaman-ternak bebas limbah di KP Muara. Puslitbang Tanaman Pangan. Bogor.
- Agus, F., A.Rachman, dan A. Dariah. 1999. Pengaruh pengolahan tanah minimum dan pemberian mulsa terhadap sifat tanah dan produksi tanaman. Buku II. Hal. 443-458 *dalam* Prosiding Seminar Nasional Sumber daya Tanah, Iklim dan Pupuk. Lido-Bogor, 6-8 Desember 1999. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian.
- Agus, F. 2012. Konservasi Tanah dan Karbon untuk Mitigasi Perubahan Iklim Mendukung Keberlanjutan Pembangunan Pertanian. Orasi Pengukuhan Profesor Riset Bidang Hidrologi dan Konservasi Tanah. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Kementerian Pertanian, Bogor, 26 September 2012.

- Agus, F., E. Surmaini, dan N. Sutrisno. 2005. Teknologi hemat air dan irigasi suplemen. *Dalam* Teknologi Pengelolaan Lahan Kering. Menuju Pertanian Produktif dan Ramah Lingkungan. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Badan Litbang Pertanian. Deptan.
- Arsyad, S. 2010. Konservasi Tanah dan Air. IPB Press. Bogor.
- Bakker, M., R. Meinzen-Dick, and F. Konradsen. Eds. 1999. Multiple Uses of Water in Irrigated Areas. A case study from Sri Lanka. SWIM paper No. 8. 1999. IWMI. Colombo.
- Bamualim, A., Kuswandi, A. Azahari, dan B. Haryanto. 2008. Sistem usaha tani tanaman – ternak. Hal 19 – 33 *dalam* Sistem Integrasi Tanaman Pangan – ternak Bebas Limbah. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. Bogor.
- BBSDL. 2011. Pengembangan Pilot Plan Pertanian Efisien Karbon Indonesia/ *Indonesian Carbon Efficient Farming (ICEF)* Berbasis Padi/Palawija-Ternak. Laporan Akhir. BBSDL (Tidak dipublikasikan).
- BPS. 2006. Statistik Indonesia 2005/2006. Badan Pusat Statistik Jakarta. Indonesia.
- Brata, K. R. 1995 a. Efektivitas mulsa vertikal sebagai tindakan konservasi tanah dan air pada pertanian lahan kering di Latosol Darmaga. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia* 5 (1): 13-19.
- Canadell JG, Pataki DE, Gifford, Houghton RA, Luo Y, Raupach MR, Smith P, and Steffen W. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proc Natl Acad Sci USA* 104: 18866–18870.
- Dariah, A. 2013. Sistem pertanian efisien karbon (CEF) sebagai bentuk adaptasi dan mitigasi sektor pertanian terhadap perubahan iklim. Hal. 195-213 *dalam* Soeparno *et al.* (eds.). Politik Pembangunan Pertanian Menghadapi Perubahan Iklim. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Kementrian Pertanian.
- Dariah, A. dan A. Rachman. 1989. Pengaruh mulsa hijauan *alley cropping* dan pupuk kandang terhadap pertumbuhan dan hasil jagung serta beberapa sifat fisik tanah. Pros. Penelitian Tanah no 8. BPT. Bogor.
- Dariah, A., U. Haryati, dan T. Budhyastoro. 2004. Teknik konservasi tanah mekanik. Hal. 109-132 *dalam* Teknologi Konservasi Tanah pada Lahan Kering Berlereng. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Badan Litbang Pertanian. Departemen Pertanian.
- Donald, C. R., J. L. Hatfield, and Ronald, L. Sass. 2000. Agricultural Contributions to Greenhouse Gas Emissions *In* Reddy and Hodges (Eds.). *Climate Change and Global Crop Productivity*. Department of Plant And Soil Sciences Mississippi State University USA. CABI Publishing.

- Dwiyanto, K dan B. Haryanto. 1999. Pembangunan Pertanian Ramah Lingkungan : Prospek pengembangan Ternak Pola Integrasi (Suatu Konsep Pemikiran & Bahan Diskusi). (Tidak dipublikasikan)
- Erfandi, D. I P.G. Widjaja-Adhi, dan M. Ramlil. 1993. Pengelolaan sistem usaha tani lahan masam tropika basah. hal. 17-28 *dalam* Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor, 18-21 Februari 1993. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Gardner, H. R. 1972. Water utilization by a dryland rowcrop. *In*: Hillel, D (ed.). *Optimizing the soil physical environment toward greater crop yield*. Academic Press. Inc. New York. Pp. : 163 – 171.
- Greb, B. W. 1983. Water conservation : central great plains. *In* Dregne, H. E., and W.O. Willis (eds.). *Dryland Agriculture*. ASA, CSSA, SSSA. Madison. Wisconsin, USA. Pp. 66-67.
- Gupta, R. K. and R. P. Rajput. 1999. Crop-water relationship studies in dryland agriculture. *In* Singh *et al.* (eds.). *Fifty Years of Dryland Agricultural Research in India*. Central Research Institut for Dryland Agriculture. Santoshnagar, Hyderabad – 500 059.
- Haryanto, B. 2009. Inovasi Teknologi Pakan Ternak dalam Sistem Integrasi Tanaman-Ternak Bebas Limbah (SITT-BL) Mendukung Upaya Peningkatan Produksi Daging. Orasi Pengukuhan Profesor Riset Bidang Pakan Ternak Ruminansia. Badan Penelitian dan pengembangan Pertanian. Departemen Pertanian. Bogor, Maret 2009.
- Haryanto, B., I. Inouu, I.G.M. Budiarsana, dan K. Dwiyanto. 2003. Pedoman Teknis. Sistem Integrasi Padi dan Ternak Sapi. Badan Litbang Pertanian. Departemen Pertanian.
- Haryati, U. 2010. Peningkatan Efisiensi Penggunaan Air untuk Pertanian Lahan Kering Berkelanjutan Melalui Berbagai Teknik Irigasi Pada Typic Kanhapludult Lampung. Disertasi. Sekolah Pascasarjana. Institut Pertanian Bogor.
- Haryati, U., A. Abdurachman, dan K. Subagyo. 2011. Efisiensi penggunaan air berbagai teknik irigasi untuk pertanaman cabai di lahan kering pada Typic Kanhapludult Lampung. Prosiding Seminar Nasional Sumber daya Lahan Pertanian. Bogor, 30 November-Desember 2010. Buku III: 24-46 *dalam* Pengelolaan Air, Iklim dan Rawa. Kementrian Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber daya Lahan Pertanian.
- Haryati, U., Haryono, dan A. Abdurachman. 1995. Pengendalian erosi dan aliran permukaan serta produksi tanaman pangan dengan berbagai teknik konservasi pada tanah Typic Eutropept di Ungaran, Jawa Tengah. *Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk* 13 : 40-50.

- Haryati, U., N. Sinukaban, K. Murtalaksana, dan A. Abdurachman. 2010. *Management Allowable Depletion Level* untuk Efisiensi Penggunaan Air Tanaman Cabai pada Tanah Typic Kanhapludults Tamanbogo, Lampung. *Jurnal Tanah dan Iklim* 31: 11 – 26.
- Haryono dan Irsal Las. 2011. Strategi Mitigasi dan Adaptasi Terhadap Dampak Perubahan Iklim Global. *pse.litbang.deptan.go.id/ind/pdf/Pros_MU_Irsal_2011*. 26 Februari 2014.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: Impact, Adaptation and Vulnerability*. Working Group II Contribution to the 4th Assessment Report. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- Kang, M. 2013. A Brief Analysis of Low-Carbon Agriculture Development Pattern. *Business and Management Research* Vol. 2, No. 2; 2013. Published by Sciedu Press. doi:10.5430/bmr.v2n2p96. URL: <http://dx.doi.org/10.5430/bmr.v2n2p96>. ISSN 1927-6001. E-ISSN 1927-601X. www.sciedu.ca/bmr. 27 Februari 2013.
- Kartika, B. dan A. Dariah. 2012. Teknologi pengelolaan air lahan kering. Hal 103-122. *dalam* Prospek Pertanian Lahan Kering dalam Mendukung Ketahanan pangan. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Kementerian Pertanian.
- Krishnappa, A. M., Y. S. Arun Kumar, Murukannappa, and B. R. Hedge. 1999. Improve in situ moisture conservation practises for stabilized crop yield in drylands. *In* Singh *et al.* (eds.). *Fifty Years of Dryland Agricultural Research in India*. Central Research Institut for Dryland Agriculture. Santoshnagar, Hyderabad – 500 059.
- Lal, R. 2007. Carbon Farming. *Editorial/Soil & Tillage Research* 96: 1–5. Elsevier.
- Lal, R., L. M. Kimble, R. F. Follett, and C. V. Cole. 1980. *The Potential of U.S. Cropland to Sequester C and Mitigate the Greenhouse Effect*. Chelsea MI: Ann Arbor Press, 1998.
- Las, I., A. Unadi, dan F. Agus. 2010. *Concept Note: Sistem Pertanian Efisien Karbon*. Monograf. Balai Besar Litbang Sumber daya Lahan (BBSLU). Badan Litbang Pertanian. (Tidak dipublikasikan).
- Middleton, R. 2005. *Air Bersih : Sumber Daya yang Rawan*. Makalah Hiji. Kedutaan Besar Amerika Serikat, Jakarta, Indonesia. <http://www.Usembassyjakarta.org/ptp/airbsri.html>. 15 Juni 2005.
- Nitis, I.M. 1995. Research methodology for semiarid crop-animal system in Indonesia. *In* Devendra, C. And C. Sevilla (eds.). *Crop-animal interaction*. IRRD Discussion Paper series No. 6. IRRD. Manila, Philippines.
- Noeralam, A. 2002. Teknik Pemanenan Air yang Efektif dalam Pengelolaan Lengan Tanah Pada Usaha tani Lahan Kering. Desertasi Doktor. Program Pasca Sarjana. Institut pertanian Bogor.

- Partowijoto, A. 2002. Penelitian kebutuhan air lahan dan tanaman di beberapa daerah irigasi. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pengairan* 16(49).
- Passiora, J. B. 1977. Grain yield, harvest index and water- use of wheat. *J. Aust. Ins. Agric. Sci.* 43 : 117-120.
- Pereira, L. S., T. Oweis, and A. Zairi. 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agric. Water Manage* 57: 175-206.
- Renault, D., M. Hemakumara, and D. Molden. 2001. Impacts of water consumption by perennial vegetation in irrigated areas of the humid tropics. A case for rethinking traditional views of irrigation design, management and performance assessment. *Annual Report 2000 – 2001. Improving Water and Land Resources Management for Food, Livelihoods and Nature*. IWMI. International Water Management Institute, Colombo.
- Scholes, M. C., D. Powlson and G. Tian. 1997. Input control and organic matter dynamic. *Geoderma* 79: 25 – 47.
- Smith P, *et al.* 2007. Mitigation contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, agriculture. *Pp 497-540 in* Metz B, Davidson O, Bosch P, Dave R, and Meyer L (Eds.). *Climate Change 2007*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McGill, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, B. Scholes, and O. Sirotenko, 2007: Agriculture. *In* [B. Metz, D.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds). *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Sulaeman, Y., Anny Mulyani, Irawan, dan Fahmuddin Agus. 2001. *Evaluasi Teknis dan Ekonomis Beberapa Alternatif Sistem Irigasi Lahan Kering*. Laporan Akhir Tahun Anggaran 2001. Bagian Proyek Penelitian Sumber daya Lahan dan Agroklimat dan Proyek Pengkajian Teknologi Pertanian Partisiptif. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian. (Tidak dipublikasikan)
- Soil Association Producer Support (SAPS). 2014. *An introduction to low carbon farming*. Information sheet. Soil Association Producer Support. South Plaza, Marlborough Street, Bristol, BS1 3 NX. T 0117 914 2400. F 0117 314 5001. E producer.support@soilassociation.org. W www.soilassociation.org/Farmersgrowers.aspx. 27 Februari 2014.
- Susanto, H., dan K. Subagyo. 2007. Pembagian air secara proporsional untuk keberlanjutan pemanfaatan air. *Jurnal Sumber daya Lahan* 1 (4): 15 – 24.

- Stevenson, F. J. 1994. Humus Chemistry, Genesis, Composition, Reaction. 2nd ed. New York. John Wiley and Sons. 512 p.
- Subagyono, K., T. Vadari, R. L. Watung, Sukristiyonubowo, and F. Agus. 2004. Managing soil erosion control in Babon Catchment, Central Java, Indonesia: Toward community-based soil conservation measures. Proceeding International Soil Conservation Organization (ISCO2004). Brisbane, Australia, 4-8 July 2004.
- Subagyono, K., U. Haryati, dan S. H. Talaohu. 2004. Teknologi konservasi air pada pertanian lahan kering. Hal. 151-188 dalam Konservasi Tanah pada Lahan Kering Berlereng. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Badan Litbang Pertanian. Departemen Pertanian.
- Sukmana, S., H. Suwardjo, A. Abdurachman, and J. Dai. 1986. Prospect of *Flemingia congesta* Roxb. for reclamation and conservation of volcanic skeletal soils. Pembrit. Penel. Tanah dan Pupuk 4: 50-54.
- Sutono, S., S. Wiganda, I. Isyafudin, dan F. Agus. 2001. Pengelolaan Sumber Daya Air dengan Teknologi Input Tinggi. Laporan Akhir Tahun Anggaran 2001. Bagian Proyek Penelitian Sumber daya Lahan dan Agroklimat dan Proyek Pengkajian Teknologi Pertanian Partisiptif. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian. (Tidak dipublikasikan).
- Suwardjo. 1981. Peranan Sisa-sisa Tanaman dalam Konservasi Tanah dan Air pada Usaha Tani Tanaman Semusim. Disertasi. Fakultas Pasca Sarjana, IPB, Bogor.
- Svehlik, Z. J. 1987. Estimation of irrigation water requirements. In Rydzewsky, J. R. (ed.). Irrigation Development planning, An Introduction for Engineers. John Wiley & Sons. Chichester. Pp. 115 - 143.
- Tala'ohu, S. H., S. Sutono, dan Y. Soelaeman. 2003. Peningkatan produktivitas lahan kering masam melalui penerapan teknologi konservasi tanah dan air. Hal. 45 - 63 dalam Prosiding Simposium Nasional Pendayagunaan Tanah Masam, Bandar Lampung, 29 - 30 September 2003. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Tala'ohu, S. H., T. Sudarto, D. Supardi, dan Kuswanda. 1989. Pengaruh pemberian pupuk kandang terhadap beberapa sifat fisik dan kimia tanah Haplorthox Kuamang Kuning. Pros. No 8. Penelitian. PPT- Bogor.
- US. Environmental Protection Agency 1200. Pensylvania Avenue, N.W. Washington, DC 20460. USA. 394.
- US. Environmental Protection Agency 2008. Inventory of US. Green house gas Emissions and Sinks: 1990-2006.
- Zhang Yongqiang, Yu Qiang, Shen Yanjun, and Liu Changming. 2003. Impact of Irrigation Schedules on Crop Production and Water Use Efficiency in the

North China Plain. Proceedings of the 1st International conference on Hidrology and water resources in Asia Pasific region Vol 1. APHW 2003. Palu-lu Plaza, Kyoto, Japan 13 - 15 March.

6. REKLAMASI LAHAN UNTUK MENGATASI MASALAH SALINITAS TANAH

Deddy Erfandi dan Ishak Juarsah
Peneliti Balitbangtan di Balai penelitian tanah

Pendahuluan

Sebagian besar masalah salinitas tanah di Indonesia tidak terlepas dari dampak perubahan iklim. Indonesia sebagai negara kepulauan yang terletak di daerah katulistiwa termasuk wilayah yang sangat rentan terhadap perubahan iklim. Perubahan pola curah hujan, kenaikan muka air laut, dan suhu udara, serta peningkatan kejadian iklim ekstrim berupa banjir dan kekeringan merupakan beberapa dampak serius perubahan iklim yang dihadapi Indonesia. Sektor pertanian merupakan sektor penting dalam menyediakan bahan pangan yang terkena dampak besar akibat kejadian ini. Output sektor pertanian turun seiring dengan adanya dampak perubahan iklim.

Perubahan iklim merupakan salah satu ancaman yang sangat serius terhadap sektor pertanian dan potensial mendatangkan masalah baru bagi keberlanjutan produksi pangan dan sistem produksi pertanian pada umumnya. Perubahan iklim adalah kondisi beberapa unsur iklim yang *magnitude* dan/atau intensitasnya cenderung berubah atau menyimpang dari dinamika dan kondisi rata-rata, menuju ke arah (*trend*) tertentu (meningkat atau menurun). Penyebab utama perubahan iklim adalah kegiatan manusia (antropogenik) yang berkaitan dengan meningkatnya emisi gas rumah kaca (GRK) seperti CO₂, methane (CH₄), CO₂, NO₂, dan CFCs (*chlorofluorocarbons*) yang mendorong terjadinya pemanasan global dan telah berlangsung sejak hampir 100 tahun terakhir. Pengaruh perubahan iklim terhadap sektor pertanian bersifat multidimensional, mulai dari sumber daya, infrastruktur pertanian, dan sistem produksi pertanian, hingga aspek ketahanan dan kemandirian pangan, serta kesejahteraan petani dan masyarakat pada umumnya. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) menyatakan bahwa pemanasan global dapat menyebabkan terjadi perubahan yang signifikan dalam sistem fisik dan biologis seperti peningkatan intensitas badai tropis, perubahan pola presipitasi, salinitas air laut, perubahan pola angin, mempengaruhi masa reproduksi hewan dan tanaman, distribusi spesies dan ukuran populasi, frekuensi serangan hama dan wabah penyakit, serta mempengaruhi berbagai ekosistem yang terdapat di daerah dengan garis lintang yang tinggi (termasuk ekosistem di daerah Artik dan Antartika), lokasi yang tinggi, serta ekosistem-ekosistem pantai.

Dampak yang ditimbulkan akibat adanya perubahan iklim ke depan akan semakin besar dan lebih lanjut akan berdampak pada sulitnya menerapkan

sistem pembangunan yang berkelanjutan. Penanganan masalah perubahan iklim dalam konteks pembangunan membutuhkan manajemen perubahan iklim secara efektif, dan pada saat bersamaan mengantisipasi dampak perubahan iklim global jangka panjang secara komprehensif yang pendekatan lintas sektor baik pada tingkat nasional, regional maupun lokal. Dalam menghadapi perubahan iklim, peningkatan ketahanan sistem dalam masyarakat untuk mengurangi resiko bahaya perubahan iklim dilakukan melalui upaya adaptasi dan mitigasi.

Adaptasi merupakan tindakan penyesuaian sistem alam dan sosial untuk menghadapi dampak negatif dari perubahan iklim. Namun upaya tersebut akan sulit memberi mandat secara efektif apabila laju perubahan iklim melebihi kemampuan beradaptasi. Oleh karena itu, adaptasi harus diimbangi dengan mitigasi, yaitu upaya mengurangi sumber maupun peningkatan penyerapan gas rumah kaca, agar supaya proses pembangunan tidak terhambat dan tujuan pembangunan berkelanjutan dapat tercapai. Dengan demikian, generasi yang akan datang tidak terbebani oleh ancaman perubahan iklim secara lebih berat.

Dalam tulisan ini dibahas mengenai salah satu dampak yang terjadi akibat perubahan iklim yaitu masalah salinitas tanah. Selain kejadiannya akibat naiknya permukaan air laut, juga dibahas masalah salinitas tanah akibat terjadinya tsunami. Dari dampak negatif yang diperoleh, maka perlu diupayakan penanganan untuk mengurangi dampak negatif yang lebih besar. Mitigasi yang dilakukan adalah berupa reklamasi lahan untuk menangani masalah salinitas tanah. Penanganan diikuti dengan pentingnya air irigasi dan drainase yang dapat berfungsi sebagai pencuci garam terlarut yang berlebihan. Sistem pengelolaan tanah dan penggunaan pembenah tanah yang mampu menurunkan kadar garam terlarut dalam tanah. Namun yang terpenting juga adalah penerapan tanaman yang toleran terhadap salinitas, agar dapat tanaman berproduksi dengan normal. Pembuatan bendungan karet seperti daerah Pantura Jawa salah satunya berfungsi menghambat limpasan (rob) atau rembesan air laut yang masuk pada persawahan.

Tulisan ini bertujuan untuk memberikan pengetahuan tentang masalah salinitas tanah yang berdampak terhadap tanah dan tanaman, terjadinya salinitas tanah serta penanganan yang harus dilakukan melalui beberapa reklamasi lahan. Dengan demikian diharapkan tulisan ini mampu membangun wawasan pengetahuan dan berpikir untuk mengurangi resiko bahaya akibat perubahan iklim khususnya masalah salinitas tanah serta dapat dijadikan bahan pengetahuan dalam merencanakan pembangunan berkelanjutan dan berwawasan lingkungan.

Dampak Perubahan Muka Air Laut

Perubahan Muka Air Laut

Berdasarkan pengamatan di beberapa pelabuhan di Indonesia, tinggi muka air laut di Indonesia dalam 20 tahun terakhir meningkat dengan laju antara 0,1 dan 0,8 cm per tahun (ADB 2009). Sementara berdasarkan data altimeter 1993-2008, laju kenaikan muka air laut di wilayah pantai Indonesia berkisar antara 0,2-0,6 cm per tahun (Sofian 2010). Kajian lain Apabila kondisi ini berlanjut terus maka dalam waktu 100 tahun kenaikan muka air laut bisa mencapai antara 20 sampai 60 cm dengan asumsi tidak terjadi penurunan tanah (*land subsidence*). Perkiraan ini sejalan dengan proyeksi dari IPCC (2007) bahwa kenaikan muka air laut pada tahun 2100 berkisar antara 0,18 dan 0,59 m. Namun beberapa kajian terakhir menyebutkan bahwa kenaikan muka air laut dapat melebihi 1 meter (Jevrejeva *et al.* 2010; Rahmstorf 2007).

Naiknya muka air laut juga bisa disebabkan oleh menurunnya tinggi muka tanah (*land subsidence*). Pengamatan di beberapa daerah pantai, penurunan muka air tanah juga terjadi dengan laju yang cukup beragam. Penurunan muka air tanah dapat terjadi akibat pergeseran lempengan tektonik, atau juga akibat dari ambiasnya muka tanah karena beban bangunan yang ada di atasnya yang disertai oleh pengambilan air tanah atau air bumi yang berlebihan. Di wilayah Semarang, *land subsidence* sudah terjadi dengan laju antara 0-1 sampai 8-9 cm per tahun. Kondisi juga terjadi di beberapa wilayah lain di Indonesia (MoE 2010).

Dampaknya Terhadap Sektor Pertanian

Di beberapa wilayah Indonesia, naiknya air laut menjadikan garis pantai semakin masuk ke daratan. Intrusi air laut meningkat dan masalah salinitas tanah menjadi kendala pada lahan pertanian. Lahan sekitar kawasan pantai menjadi tergenang secara permanen. Menurut Susandi *et al.* (2008) memproyeksikan bahwa kehilangan daratan di wilayah Indonesia akibat kenaikan air laut untuk tahun 2010, 2050, dan 2100 berturut-turut seluas 7408 km², 30120 km², dan 100000 km². Sedangkan untuk studi kasusnya di Banjarmasin, diproyeksikan bahwa 0,03 % luas daratan yang hilang tersebut adalah daratan Banjarmasin (tabel 1.).

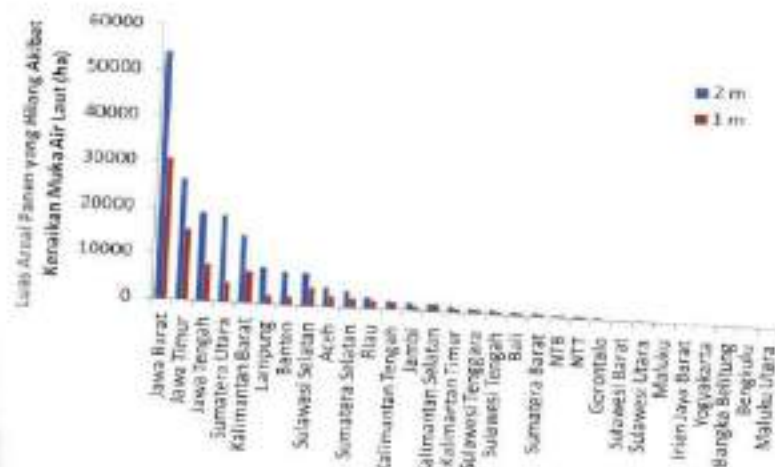
Wilayah pantai yang rentan terhadap dampak kenaikan muka air laut adalah wilayah pantai yang berada di dataran rendah dan landai. Pantai Utara Jawa merupakan wilayah pantai yang memiliki karakteristik seperti ini. Sebagian besar wilayah Pantura merupakan wilayah pertanaman padi sawah. Luas pertanaman padi di wilayah Pantura mencapai 1,7 juta ha, sehingga menjadikan wilayah ini sebagai pusat produksi padi nasional. Oleh karena itu kenaikan muka air laut akan mengancam keberadaan lahan persawahan yang ada di kawasan pantai dan menjadi ancaman serius terhadap ketahanan pangan nasional.

Tabel 1. Luas daratan Banjarmasin yang hilang karena kenaikan muka air laut.

Tahun	Luas daratan yang hilang (km ²)
2010	0,530
2050	1,039
2100	2,581

Sumber : Susandi *et al.* (2008)

Lahan pertanian dominan yang berada dekat pantai adalah lahan sawah. Menurut Nicholls dan Mimura (1998), dengan kenaikan muka air laut setinggi 1 m, diperkirakan luas lahan sawah yang akan terancam mencapai 1,6 juta ha. Suroso *et al.* (2009) juga memperkirakan pada tahun 2050 kenaikan muka air laut akan menurunkan luas pertanaman padi sawah di Jawa dan Bali sekitar 82.556 ha, di Sulawesi 78.701 ha, di Kalimantan 25.372 ha, di Sumatra 3.170 ha, dan di Lombok 2.123 ha. Namun Foerster *et al.* (2011) dengan menggunakan data terbaru menunjukkan bahwa kenaikan muka air laut setinggi 1 meter diperkirakan hanya akan menenggelamkan wilayah pertanian pantai secara permanen sekitar 56 ribu ha. Lebih lanjut mereka memprediksi bahwa kenaikan muka air laut setinggi 2 m akan menurunkan total luas panen sekitar 110 ribu ha. Propinsi yang akan terkena dampak paling besar ialah Propinsi Jawa Barat yaitu sekitar (30%), kemudian diikuti oleh Jawa Timur, Jawa Tengah, Sumatera Utara, Kalimantan Barat, Lampung, Banten dan Sulawesi Selatan, sedangkan propinsi lainnya relatif kecil (Gambar 1). Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa wilayah pertanian yang paling besar terkena dampak kenaikan muka air laut ialah yang ada di pulau Jawa, yaitu 55% dari total luas yang tenggelam.

Gambar 1. Luas panen yang akan hilang akibat kenaikan muka air laut setinggi 1 m di Indonesia (Boer *et al.* 2011)

Masalah Salinitas Tanah

Terjadinya Salinitas Tanah

Dampak lain akibat kenaikan muka air laut ialah semakin meningkatnya masalah salinitas. Tanah salin di dunia mencakup 3,1% (397 juta ha) dari luas lahan total dunia (Setia *et al.* 2013). Salinitas tanah merupakan tanah yang mengandung garam terlarut yang dapat merusak produktivitas tanaman. Ada beberapa jenis garam tanah seperti Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, dan Cl. Garam terlarut ini merupakan nutrisi bagi tanaman. Namun apabila terakumulasi garam yang berlebihan dapat mengganggu pertumbuhan tanaman. Proses inilah yang disebut dengan salinisasi. Melalui evaporasi mengeluarkan air dari dalam tanah ke permukaan, dan air yang menguap meninggalkan garam yang berwarna putih (kerak) di permukaan tanah serta memperlihatkan retak-retak yang cukup jelas (Gambar 2). Kejadian ini diperlihatkan pada saat kemarau atau curah hujan yang mulai berkurang.

Sumber garam yang mempengaruhi salinitas tanah dapat berupa hasil pelucutan mineral tanah. Akumulasi garam tersebut dapat menutup permukaan tanah, sehingga menyebabkan air sulit menembus ke dalam tanah. Dengan penguapan secara alami garam-garam akan terlepas dan terdrainase keluar dari tanah dengan tingkat presipitasi yang tinggi. Pada daerah kering, garam-garam dapat terakumulasi karena ketiadaan air yang membilas garam-garam tersebut, sehingga terbentuk tanah salin.

Daerah Pantura Indramayu mempunyai karakteristik membentuk tanah salin salah satunya berasal dari bahan endapan marin yang mempunyai

pengaruh laut yang kuat, serta merupakan wilayah beting pantai dan delta yang masih terkena pengaruh aktivitas laut (Erfandi dan Rachman 2011). Namun demikian dalam satu zona kriteria salinitas lahan terdapat variasi perbedaan karakteristik tanah yang spesifik. Hal ini dimungkinkan adanya pola drainase dan irigasi yang bervariasi.



Gambar 2. Tanah salin dengan kerak garam dan keretakan pada permukaan tanah (Foto: Deddy Erfandi)

Kontribusi terbesar sumber garam yang mengganggu pertumbuhan padi sawah pada areal dekat pantai adalah yang berasal dari air laut. Air laut masuk ke daratan melalui intrusi atau air laut pasang (Rob). Hal ini akibat dari naiknya permukaan air laut. Air laut mengandung garam yang tinggi (>500 me/l), terutama dalam bentuk NaCl, kombinasi basa-basa kation (K, Ca, Mg) dan sulfat, bikarbonat dan klorin (anion). Intrusi air laut atau air asin wilayah Indramayu, khususnya di Kandanghaur sudah menyusup hingga 8 km untuk air payau dan air asin 6 km. Sedangkan di Lohbener air payau menyebar 17 km dan air asin menyebar sejauh 13 km (Pikiran Rakyat 2009). Dampak intrusi air laut atau masuknya air asin ke daratan akan terasa pada saat kemarau.

Kejadian tsunami di Aceh, air laut dihempas ke daratan membawa garam-garam, akan tetapi sebagian besar lahan tergenang dapat tercuci oleh hujan. Namun yang di angkut tsunami berupa lumpur yang mengandung lapisan-lapisan liat dan debu, yang justru mengandung residu garam yang tinggi. Lumpur yang dihasilkan tsunami Aceh, memiliki DHL (daya hantar listrik) antara 3,7 sampai 48,9 dS/m dengan kandungan garam antara 9000-26000 ppm (Rachman 2007). Lapisan liat atau debu tersebut sangat mudah diidentifikasi dari retakan-retakan yang menyebar di seluruh permukaan tanah.

Tanah salin juga dapat terjadi pada persawahan yang tercemar limbah industri. Kasus kerusakan sebagian besar tanaman padi dan gagal panen di sekitar industri tekstil Rancaekek, diakibatkan oleh kandungan Na yang tinggi. Kandungan Na dalam tanah berkisar 467-2.983 mg Na/kg (Undang Kurnia *et al.* 2004). Pencemaran tanah dan menyebabkan tanah salin dapat terjadi pada persawahan di sekitar eksplorasi penampungan bahan bakar minyak (BBM) di Wilayah Bekasi (Balittanah 2013). Areal persawahan tersebut tercemar akibat dalam proses pengolahan industri menggunakan air laut. Hal ini yang mengakibatkan tanaman padi gagal panen.

Karakterisasi Salinitas Tanah

Kadar garam terlarut dalam tanah dipengaruhi oleh *electrical conductivity* (EC), pH tanah dan *exchangeable sodium percentage* (ESP). Berdasarkan kriteria tersebut tanah bersalinitas dibedakan atas tanah salin, tanah sodik dan tanah salin-sodik (Lamond and Whitney 1992). Hal ini untuk mempermudah dan mengetahui cara pengelolaan lahan dan reklamasi.

Tanah Salin

Pada dasarnya tanah mengandung garam terlarut, tetapi ketika jumlahnya berbahaya bagi pertumbuhan tanaman maka dapat disebut salin. Keadan sifat fisik tanah salin, seperti struktur tanah dan permeabilitas tidak normal. Dapat kembali normal atau baik bagi pertumbuhan tanaman, apabila kualitas air yang tersedia baik. Tanah salin ditandai dengan pertumbuhan tidak teratur dan kerak putih pada permukaan tanah. Garam-garam ini kebanyakan dalam bentuk sulfat dan atau kalsium klorida dan magnesium. Dalam kondisi fisik normal tanah salin memiliki $EC \geq 4$ dS/m, $pH < 8,5$ dan $ESP < 15\%$.

Tanah Sodik

Tanah sodik memiliki total garam yang rendah, tetapi nilai tukar natrium tinggi. Tanah ini secara fisik, lengket saat basah, hampir kedap air dan memiliki liat tinggi. Pada saat kering tanah menjadi keras, liat dan berkerak. Tanah sodik memiliki persentase tukar natrium ($ESP \geq 15\%$, $pH > 8,5$, dan $EC < 4$ dS/m). Tanah sodium merugikan pertumbuhan tanaman. Struktur tanah ini tidak stabil, sehingga drainase berjalan lambat.

Salin - Sodik Tanah

Tanah ini memiliki karakteristik kimia dari keduanya yaitu $ESP > 15\%$, $pH < 8,5$ dan $EC > 4$ dS/m. Keadaan tanah ini dipengaruhi oleh garam-garam terlarut yang berlebihan dan Na^+ yang tinggi. Sedang keadaan fisik tanah memiliki struktur tanah sedang (tidak seburuk tanah sodik) dan gumpai garam membantu penyebaran Na^+ . Umumnya $pH < 8,5$, namun dapat meningkat dengan penurunan, kecuali konsentrasi garam terlarut Ca^{+2} dan Mg^{+2} tinggi, begitu juga dengan air irigasinya (Brady and Weil 2002).

Salinitas Tanah

Untuk mempermudah perbaikan atau merehabilitasi lahan, perlu diketahui salinitas tanah. Salinitas tanah secara umum diketahui dalam satuan desimena per meter (dS/m). Dalam pengukuran di laboratorium, contoh tanah dikorak (1: 5) dan diukur dengan EC meter (ECe) berdasarkan Slavich dan Nelson (1991). Pada Tabel 2 disajikan status salinitas tanah berdasarkan

Taylor (1993) dengan perhitungan ECe berdasarkan Slavisch dan Peterson (1993).

Tabel 2. Status salinitas tanah (Taylor 1993)

Status salinitas	Klas	ECe
Netral	0	<2
Rendah	1	2-4
Sedang	2	4-8
Tinggi	3	8-16
Sangat Tinggi	4	>16

Status salinitas yang diamati di wilayah pantura Indramayu, salah satunya di kecamatan Kandanghaur. Tingginya salinitas di wilayah ini sangat dipengaruhi oleh pembentukan tanah marin yaitu dari endapan marin, sehingga membentuk delta. Selain itu juga dipengaruhi oleh penggunaan lahan sekitarnya seperti lahan untuk pembuatan garam dan kolam ikan (empang) serta sumber air kurang dan kondisi jaringan irigasi kurang baik sehingga air irigasi yang dialirkan tidak merata, bahkan kurang untuk mengairi sawah. Pada kondisi ini air asin menyusup ke sungai, kanal dan rawa sehingga salinitas menjadi tinggi. Pengamatan beberapa desa/kecamatan di Kandanghaur disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Salinitas Tanah pada beberapa desa di Kecamatan Kandanghaur

Desa/ Kecamatan	Kedalaman (cm)	ECa (dS/m)	pH (H ₂ O)	ECe (dS/m)	Na (cmol+/kg)	Status salinitas
Karanganyar	0-30	4,13	6,9	6,17	5,71	Sangat tinggi
	30-70	4,97	7,0	11,66	7,80	
Bulak	0-30	2,62	5,3	4,90	4,17	Tinggi
	30-70	3,11	4,8	5,93	4,61	
Wirakanan	0-30	0,81	6,8	3,05	4,09	Sedang
	30-70	1,19	7,0	2,95	4,32	

Sumber: Erfandi and Rachman (2011)

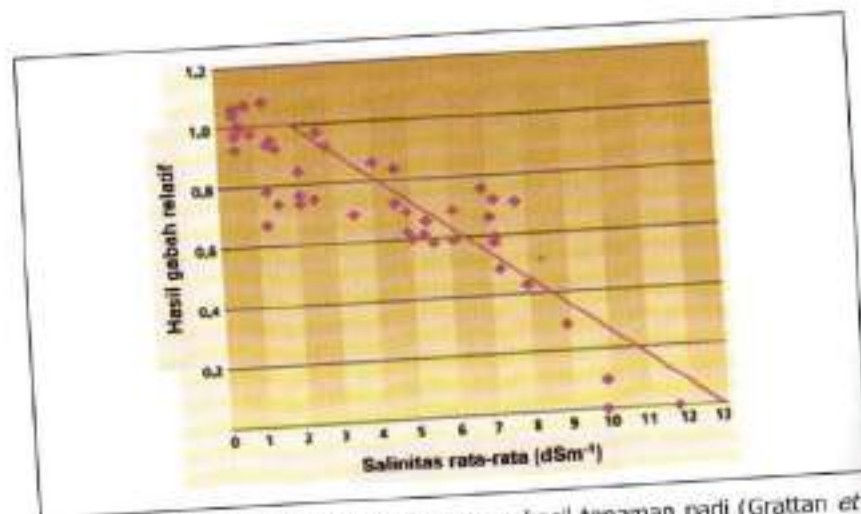
Dampak Salinitas Tanah Terhadap Tanah dan Tanaman

Kandungan NaCl yang tinggi pada tanah salin menyebabkan rusaknya struktur tanah, sehingga aerasi dan permeabilitas tanah tersebut menjadi sangat rendah. Salinitas tanah tidak hanya mempengaruhi karakteristik kimia dan fisik tanah tetapi juga sangat mempengaruhi mikroba dan sifat biokimia tanah (Rietz and Haynes, 2003). Banyaknya ion Na di dalam tanah salin menyebabkan berkurangnya ion-ion Ca, Mg, dan K yang dapat ditukar, yang berakibat menurunnya ketersediaan unsur tersebut bagi tanaman. Penurunan produktivitas

tanaman akibat tanah salin dapat menurunkan karbon tanah karena aktivitas mikroba dan laju dekomposisi karbon organik tanah (SOC) menurun. Secara historis, kehilangan karbon organik tanah pada tanah salin di dunia saat ini sekitar rata-rata 3,47 t/ha (Setia et al 2013).

Pengaruh salinitas terhadap tanaman mencakup tiga hal yaitu tekanan osmosis, keseimbangan hara dan pengaruh racun. Bertambahnya konsentrasi garam di dalam suatu larutan tanah, meningkatkan potensial osmotik larutan tanah tersebut. Oleh sebab itu salinitas dapat menyebabkan tanaman sulit menyerap air hingga terjadi kekeringan fisiologis. Gejala awal munculnya kerusakan tanaman oleh salinitas adalah (a) warna daun yang menjadi lebih gelap daripada warna normal yang hijau-kebiruan; (b) ukuran daun yang lebih kecil; dan (c) batang dengan jarak tangkai daun yang lebih pendek. Jika permasalahannya menjadi lebih parah, daun akan (a) menjadi kuning (klorosis) dan (b) tepi daun mati mengering terkena *burning* (terbakar, menjadi kecoklatan) (FAO 2005).

Salah satu masalah salinitas di Indonesia yaitu di sepanjang Pantura Jawa. Berdasarkan wawancara, banyak petani yang telah merubah usahatani padi menjadi ladang garam dan ikan, atau memberakan lahannya karena meningkatnya salinitas (Sembiring dan Gani 2007). Menurut Gregorio et al. (2002) tanah salin mempunyai sifat merugikan tanaman padi, karena tanaman akan mengalami kekurangan unsur Zn dan P serta kandung toksik tinggi (Fe, Al dan asam organik), terendam, air tanah dalam dan kekeringan. Gejala keracunan garam pada tanaman padi adalah terhambatnya pertumbuhan, berkurangnya anakan, memutihnya ujung daun dan klorosis pada daun. Walaupun tanaman padi tergolong agak toleran terhadap salinitas, namun *Electric Conductivity* antara 6-10 dS/m menyebabkan penurunan produksi sampai 50% (Brinkman dan Singh 1982). Berdasarkan penelitian rumah kaca, hasil tanaman padi yang ditanam pada tanah dengan salinitas 3.9 dan 6.5 dS/m, hasil tanaman menurun sebesar 25% dan 55% bila dibandingkan dengan tanah bersalinitas 1 dS/m (Zeng dan Shannon 2000). Penelitian lain yang dilakukan oleh Grattan et al. (2002) juga menunjukkan hasil yang relatif sama. Secara umum hasil padi akan menurun secara linear dengan meningkatnya salinitas tanah di atas dua dengan laju penurunan sebesar 10% per setiap kenaikan salinitas 1 dS/m (Gambar 3).



Gambar 3. Hubungan antara nilai EC dengan hasil tanaman padi (Grattan *et al.* 2002)

Menurut Dobermann dan Fairhurst (2000), tanaman padi sangat sensitif terhadap salinitas pada saat *transplanting*, tanaman muda, dan fase pembungaan. Menurut Zeng dan Shanon (2000) salinitas menurunkan komponen hasil seperti hasil gabah, panjang malai, jumlah gabah per malai, mempertambat munculnya malai dan pembungaan, menurunkan viabilitas benih.

Di Indonesia penelitian mengenai dampak salinitas terhadap tanaman padi banyak dilakukan pada lahan sawah yang terkena dampak Tsunami di Aceh. Gani (2005) melaporkan bahwa pada bulan Januari 2005, sebulan setelah Tsunami Aceh, tanah menjadi sangat salin dengan EC 4,27-15,18 dS/m. Rachman (2007) melaporkan bahwa salinitas dari lumpur Tsunami Aceh berkisar 3,7-48,9 dS/m dengan kandungan garam antara 9000-26000 ppm. Pertanaman padi pada daerah bekas tsunami Aceh menunjukkan pertumbuhan yang baik pada fase vegetatif, tetapi mengalami penurunan produksi sampai 50% dibanding sebelum tsunami karena banyak biji yang hampa (Slavich *et al.* 2008). Beberapa uji adaptasi menunjukkan bahwa beberapa varietas padi lebih mampu beradaptasi/toleran terhadap salinitas dibandingkan yang lainnya. Pengujian di Aceh Besar – NAD pada lahan terkena tsunami menunjukkan bahwa beberapa varietas dari lahan pasang-surut toleran terhadap salinitas pada stadia vegetatif, yaitu Mendawak, Krueng Aceh, Seilalan, Banyu Asin, dan Cisadane (Sembiring dan Gani 2007). Dampak Tingginya salinitas akibat tsunami Aceh juga menyebabkan rendahnya produksi kacang tanah dan kedelai karena pokonya hampa mencapai 42%. Produktivitas kacang tanah (0,7 t/ha) dan kedelai (0,9

t/ha) pada berbagai kabupaten di Aceh, jauh lebih rendah daripada sebelum kejadian tsunami (Iskandar dan Chairunnas 2008).

Sharma dan Minhas (2005) mengatakan bahwa ada beberapa alternatif untuk menangani masalah salinitas tanah. 1) Pengelolaan tanaman termasuk pola tanam dan pemilihan varietas yang toleran terhadap salinitas; 2) Pengaturan air irigasi termasuk perbaikan irigasi dan drainase seperti saluran tersier dan saluran antar petakan sawah; 3) Penggunaan amelioran seperti gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dan bahan organik; dan 4) Mempelajari kebiasaan petani dalam penanganan salinitas tanah.

Reklamasi Lahan pada Lahan Bersalinitas

Irigasi dan Drainase

Air bersih merupakan satu-satunya unsur penting untuk proses desalinisasi. Begitu juga halnya dengan air drainase untuk mencuci secara efektif garam dari suatu lahan. Salah satu fungsi air irigasi adalah untuk mendorong air laut yang masuk melalui sungai atau kanal-kanal (Sharma dan Minhas 2005). Secara alami daya serap tanah dan kondisi drainase yang baik memungkinkan terjadinya perkolasi air dan drainase dari lahan. Penerapan air melalui pengelontoran dapat lebih efektif bila kondisi kadar air tanah tak jenuh dibandingkan dengan keadaan jenuh. Hal ini untuk memungkinkan terjadinya pencucian atau penyerapan daripada potensi limpasan (Balba 1995). Tabel 4 memperlihatkan kebutuhan jumlah air untuk proses pencucian, namun hal ini tergantung dari tekstur tanah dan drainase. Pembuatan drainase pada areal pembatas sangat efektif untuk proses desalinisasi, misalnya dibuat drainase antara lahan sawah dengan lahan tambak (Gambar 4). Selain itu perbaikan saluran irigasi sangat membantu mempercepat pencucian salinitas tanah (Gambar 5).



Gambar 4. Drainase yang dibuat sebagai pembatas lahan (Foto: Deddy Erfandi)



Gambar 5. Perbaikan saluran irigasi sangat diperlukan (Foto: Deddy Erfandi)

Tabel 4. Perkiraan penggunaan air untuk pencucian garam (Cardon *et al.* 2013)

Persentase penurunan salinitas (%)	Jumlah kebutuhan air (inci)
50	6
80	12
90	24

Contoh: Jika EC tanah 8 dS/m dan akan diturunkan menjadi 4 dS/m, maka turunnya 50 %. Jadi cukup membutuhkan air 6 inci.

Irigasi merupakan faktor terpenting dalam mengatasi salinitas. Sebagai contoh, wilayah Indramayu di aliri oleh 2 daerah irigasi (DI) yaitu irigasi Salamdarma dan irigasi Jati Tujuh (Bendungan Rentang). Namun karena sumber air kurang dan infrastruktur yang kurang baik menyebabkan air asin menyusup ke sungai, kanal, dan rawa. Hal ini terjadi di Kecamatan Kandanghaur yang areal sawahnya bermasalah dengan salinitas. Air yang dialir melalui irigasi tidak merata, bahkan kurang untuk mengairi sawah. Pada saat kemarau atau curah hujan berkurang dapat berakibat buruk terhadap tanaman padi, seperti, perakaran terganggu, tanaman kering dan rentan terhadap serangan hama dan penyakit (Gambar 5).



Gambar 5. Tanaman padi terganggu dan gagal panen karena salinitas tinggi (Foto: Deddy Erfandi)

Lahan sawah yang tercemar limbah industri tekstil menyebabkan kerusakan tanaman padi, dan gagal panen terutama pada musim kemarau, seperti yang terjadi pada lahan persawahan di Kec. Rancaekek, Kab. Bandung. Penelitian di rumah kaca yang menggunakan tanah dari lahan sawah di daerah tersebut, menunjukkan hasil gabah dari tanah yang dicuci dengan air bersih/air bebas ion meningkat 2-2,5 kali dibandingkan dengan hasil gabah dari tanah yang tidak dicuci (Haryono *et al.* 2003). Dari hasil penelitian tersebut disimpulkan bahwa natrium (Na) merupakan penyebab utama rusaknya tanaman padi dan menurunnya hasil gabah. Penelitian yang dilakukan Suganda *et al.* (2003) di daerah yang sama memperlihatkan kandungan Na dalam tanah sawah sangat tinggi, berkisar antara 1.300 dan 2.300 ppm.

Untuk mengatasi kandungan Na yang tinggi di dalam tanah sawah, Undang Kumia *et al.* (2004) melakukan penelitian dengan cara pengolahan tanah dan pencucian atau drainase. Cara tersebut dilakukan berdasarkan prinsip bahwa bila garam dilarutkan dengan air bersih akan berkurang konsentrasinya. Air bersih dapat diperoleh dari berbagai sumber, seperti sumur dalam dan sungai yang masih bersih atau tidak tercemar. Pengolahan tanah dimaksudkan untuk mengaduk-aduk garam yang terakumulasi di dalam tanah atau lumpur yang ada di lapisan olah agar larut pada saat pencucian. Hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa pengolahan tanah dan pencucian mampu menurunkan konsentrasi Na dalam air drainase (Gambar 2). Kandungan Na berkurang dari 1.100 ppm menjadi 450 ppm setelah pengolahan tanah pertama (PT 1) dan menjadi 300 ppm setelah pengolahan tanah kedua (PT 2). Selama pertumbuhan tanaman, konsentrasi Na dalam air drainase berkurang dari 300 ppm pada satu

minggu setelah tanam menjadi 60 ppm pada minggu ke-15. Akan tetapi, cara pengolahan tanah, baik pengolahan tanah biasa maupun pengolahan tanah dalam, dan selang waktu pencucian atau drainase setiap 1, 2, dan 3 minggu tidak secara nyata menurunkan konsentrasi Na dalam air drainase. Namun demikian, pengolahan tanah biasa dan pencucian setiap 3 minggu merupakan pilihan yang baik, karena perlakuan tersebut paling efisien dan pengaruhnya sama baik dengan perlakuan lainnya. Hasil penelitian juga memperlihatkan bahwa pertumbuhan tanaman sangat baik dan hasil gabah meningkat mencapai 8-10 t/ha (Tabel 5). Setelah tanah mengalami pencucian, tanaman padi menunjukkan pertumbuhan yang normal seperti sebelum terjadi pencemaran.

Tabel 5. Pengaruh pengolahan tanah dan pencucian/drainase terhadap pertumbuhan tanaman dan hasil padi pada lahan sawah yang tercemar limbah industri tekstil

Perlakuan	Tinggi tanaman	Jumlah anakan	Hasil gabah
	cm	batang	t/ha
Kontrol	41	23	1,8
Pengolahan tanah biasa, didrainase setiap 1 minggu	94	37	9,7
Pengolahan tanah biasa, didrainase setiap 2 minggu	95	34	8,9
Pengolahan tanah biasa, didrainase setiap 3 minggu	90	37	10,5
Pengolahan tanah dalam, didrainase setiap 1 minggu	95	38	10,5
Pengolahan tanah dalam, didrainase setiap 2 minggu	94	37	9,3
Pengolahan tanah dalam, didrainase setiap 3 minggu	94	36	8,5

Sumber: Undang Kurnia *et al.* (2004).

Pengelolaan Tanah

Satu satu pilihan yang efektif untuk mempercepat pencucian garam adalah menghancurkan lapisan permukaan tanah dengan pengolahan tanah. Pada lahan kering pengolahan tanah secara teratur dapat meningkatkan perkolasi. Sedangkan pada lahan sawah pengolahan tanah dapat membantu melepaskan garam dan larut dalam air melalui drainase. Namun pengolahan tanah tidak cenderung berpotensi untuk mengurangi akumulasi garam di daerah perakaran. Hal ini tergantung distribusi dan akumulasi garam terlarut pada kedalaman tanah. Beberapa penelitian mengatakan bahwa untuk mengurangi akumulasi garam terlarut, persawahan dapat dijadikan alternatif (van Asten *et al.* 2004; Rao and Bhattacharya 2001; Krishnamurthy *et al.* 2009).

Pengelolaan lahan dengan cara menutup permukaan tanah atau penggunaan residu tanaman merupakan cara efektif untuk mengurangi kehilangan air melalui evaporasi. Hal ini karena berguna untuk mengurangi

gerakan garam-garam terlarut ke zone perakaran atau ke permukaan tanah. Dari hasil penelitian di Cina selama 12 tahun bahwa penggunaan sisa tanaman dapat meningkatkan porositas tanah sebesar 20,9%, meningkatkan struktur tanah dan infiltrasi. Hal ini berkontribusi untuk mengurangi salinitas tanah sebesar 20,3 - 73,4% (Wang *et al.* 2014). Mulsa plastik yang digunakan dengan irigasi tetes secara efektif dapat mengurangi konsentrasi garam akibat penguapan. Irigasi tetes dibawah permukaan tanah dapat mengurangi efek yang merugikan pada perkecambahan dan akar tanaman.

Pencucian garam pada tanah bersalinitas dapat memberikan dampak positif terhadap peningkatan produktivitas tanaman pada areal daerah irigasi. Penelitian Gabriel *et al.* (2013) yang dilakukan selama 3,5 tahun pada musim dingin dengan perlakuan pencucian dan menggunakan tanaman penutup tanah (CC). Hal ini dilakukan untuk mempengaruhi akumulasi garam tanah dan pencucian garam dalam sistem irigasi. Ternyata jumlah pencucian garam selama empat periode pada bera musim dingin adalah 26 Mg/ha, sedangkan <18 Mg/ha dengan adanya CC. Dengan demikian penanaman tanaman penutup tanah (CC) secara periodik, sehingga pada masa pertumbuhan tanaman tidak terganggu.

Pembenah Tanah

Masalah tanah salin salah satunya adalah kelebihan Na^+ , sehingga untuk mereklamasi keadaan tanah sodik atau salin - sodik dibutuhkan pertukaran kation lain, yaitu Ca^{2+} atau Mg^{2+} . Hal ini dilakukan dengan menambahkan pembenah tanah yang secara langsung maupun tidak langsung melepaskan Ca^{2+} atau Mg^{2+} . Untuk memperbaiki sodisitas tanah dapat digunakan gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), kapur (CaCO_3), kalsium klorida (CaCl_2), magnesium klorida (MgCl_2), sulfur dan bahan asam sulfat, dan pembenah tanah organik. Gypsum sering digunakan pada tanah sodik, karena dapat diterapkan pada lahan kering atau yang memiliki air irigasi. Gypsum lambat bereaksi dan dapat bereaksi dalam tanah untuk jangka waktu yang lama. Agar reaktivitasnya maksimal dan efektif, maka gipsum yang digunakan harus memiliki kehalusan 60 mesh. Untuk tanah salin-sodik, kelebihan Na^+ harus diubah terlebih dahulu. Oleh karena itu, pembenah tanah yang mengandung Ca^{2+} diterapkan untuk menggantikan Na^+ , dan kemudian air yang berlebihan diterapkan untuk mencuci Na^+ dan garam lainnya. Menurut Suharyani *et al.* 2012 bahwa perbaikan tanah salin dengan menggunakan gipsum dan pupuk kandang dapat meningkatkan serapan nitrogen dan fosfor pada rumput benggala (*Panicum maximum*). Penggunaan gipsum 100 % disertai penanaman rumput *Leptochloa fusca* dapat menurunkan kadar Na^+ (Qadir *et al.* 1996). Menurut Akhter *et al.* (2003), dengan penanaman rumput *Leptochloa fusca* selama lima tahun dapat meningkatkan pencucian garam-garam, sehingga tanaman dapat tumbuh pada tanah salin yang terlanjar.

Salinitas tanah merupakan salah satu proses degradasi lahan yang dapat mengancam komunitas mikroba dan menghambat pertumbuhan tanaman. Dengan merubah proses bahan organik, indeks biologis seperti respirasi tanah dan biomassa mikroba dapat menurun dengan meningkatnya tingkat salinitas. Efek merusak dari salinitas tanah terhadap mikroorganisme tanah dapat dikurangi dengan pemberian bahan organik. Dengan penambahan bahan organik dapat menyebabkan diferensiasi spasial dari komunitas mikroba dalam tanah. Menurut Wicher *et al.* (2006), melalui proses dekomposisi tanaman jagung (jerami jagung) dapat mempengaruhi salinitas tanah serta respon terhadap komunitas mikroba tanah. Selain itu aktivitas mikrobia tanah melalui respirasi tanah dapat merespon dengan cepat perubahan EC. Melalui biomassa yang besar dapat lebih beradaptasi dengan perubahan EC dibandingkan dengan biomassa kecil yang telah tertekan oleh salinitas tanah (Yan and Marshner 2013).

Kerusakan lahan pertanian akibat Tsunami Aceh tahun 2004 sebagian besar karena endapan Lumpur laut dengan EC 3,7 - 48,9 dS/m (Rachman 2007). Untuk memperbaiki lahan digunakan gipsum dan pengolahan tanah (Erfandi *et al.* 2006). Gipsum yang diterapkan selama 1 bulan dapat menurunkan kadar Na. Dengan pengolahan tanah sedalam 30 cm, mampu menurunkan EC. Tamrin *et al.* (2006) menyatakan bahwa dengan menggunakan pupuk kandang 20 t/ha dikombinasikan dengan pemupukan mampu menghasilkan kacang tanah 1,18 t/ha pada tanah bekas tsunami dengan pada EC 12,74 dS/m.

Tanaman yang Toleran

Salinitas tanah yang berlebihan dapat mengurangi hasil tanaman atau gagal panen padi. Hal ini diakibatkan jenis tanaman yang ditanam tidak toleran terhadap salinitas tanah. Ada 3 tipe tanaman yang toleran terhadap salinitas tanah (Malcon *et al.* 2003). Pertama, Halophyta yaitu tanaman yang dapat bertahan dengan kadar Na tinggi. Kedua, Halophilic yaitu tanaman yang dapat bertahan dengan kadar Na yang sedikit. Ketiga, Glycophyta yaitu tanaman yang peka terhadap kadar Na. Namun pada golongan ini ada 2 tipe, yaitu tanaman yang masih toleran garam hingga NaCl sebesar 200 mM pada jaringan tanaman, seperti Barley. Kemudian golongan tanaman yang sensitive terhadap salinitas (<100 mM), misalnya Jagung dan kacang-kacangan. Menurut Maas (1984) tanaman serelia yang semi toleran adalah kedelai, sorgum dan gandum, sedangkan padi, kacang tanah, jagung, dan kacang tunggak termasuk semi-sensitif. Batas ambang tanaman palawija, adalah: barley 8 dS/m, jagung 1,7 dS/m, kacang tanah 3,2 dS/m, kacang tunggak 4,9 dS/m, gandum 6,0 dS/m, kedelai 5,0 dS/m (Maas 1984).

Salinitas dan alkalinitas tanah berakibat buruk pada produktivitas tanaman padi dan kualitas beras. Kandungan amilosa pada beras sangat dipengaruhi oleh keadaan respon pada salinitas rendah. Oleh karena itu sangat penting

dipertimbangkan dalam pemuliaan padi untuk toleransi garam. Kualitas gabah genotype Toleran dan Semi Toleran tidak terlalu terpengaruh oleh garam alkali dan stres dibandingkan dengan yang Sensitif (Rao *et al.* 2013). Pada areal yang dipengaruhi intrusi air laut varietasi padi sangat mempengaruhi. Hasil penelitian Nurawan dan Haryati (2008) menyatakan bahwa varietas Pungkur lebih toleran dibandingkan dengan Banyuasin dan Mendawak, meskipun hasilnya belum optimal. Hal lain juga bahwa penggunaan pupuk ZA dapat dipenuhi dari dampak intrusi air laut. Walaupun demikian penggunaan bahan organik seperti kompos, sisa tanaman padi dan pupuk kandang sangat diperlukan.

Beberapa uji adaptasi menunjukkan bahwa beberapa varietas padi lebih mampu beradaptasi/toleran terhadap salinitas dibandingkan yang lainnya. Pengujian di Aceh Besar - NAD pada lahan terkena tsunami menunjukkan bahwa beberapa varietas dari lahan pasang-surut toleran terhadap salinitas pada stadia vegetatif, yaitu Mendawak, Krueng Aceh, Seilalan, Banyuasin dan Cisadane (Sembiring dan Gani 2007). Dampak Tingginya salinitas akibat tsunami Aceh juga menyebabkan rendahnya produksi kacang tanah dan kedelai karena polong hampa mencapai 42%. Produktivitas kacang tanah (0,7 t/ha) dan kedelai (0,9 t/ha) pada berbagai kabupaten di Aceh, jauh lebih rendah daripada sebelum kejadian tsunami (Iskandar dan Chairunnas 2008).

Bendungan Karet Penahan Air Laut Pasang

Bendungan karet di Indonesia sudah diterapkan sejak tahun 1989 dengan sistem pengisian udara. Manfaat yang diambil dengan konstruksi ini adalah dalam rangka peningkatan kebutuhan air untuk kepentingan penduduk maupun sebagai air irigasi pada saat kemarau. Hal ini dianggap penting sebagai pemecahan masalah air pada saat kekeringan. Bendungan karet diterapkan melebar pada ekur sungai (Gambar 6), ditutup/dikembangkan pada musim kemarau dan dikempiskan pada musim penghujan. Penempatannya selalu dekat dengan wilayah pantai atau wilayah yang terkena dampak langsung air laut.



Gambar 6. Bendungan karet sebagai penghambat intrusi air laut. (Foto: Deddy Erfandi).

Selain sebagai pencegah intrusi air laut, bendungan karet juga dapat penyedia air irigasi pedesaan, sehingga pertanian menjadi produktif. Bendungan karet dapat dirancang pada daerah muara dengan fungsi ganda yaitu sebagai penahan intrusi air laut dan penahan air segar yang terbuang ke laut (Luknanto 2002).

Penutup

Masalah salinitas tanah merupakan salah satu dampak dari perubahan iklim yang dapat menurunkan produktivitas tanaman. Penyebabnya adalah permukaan air laut meningkat, sehingga daratan yang berdekatan dengan pantai dapat terkontaminasi dengan air laut. Namun wilayah yang jauh dari pantai pun dapat terkontaminasi melalui air laut yang menyusup ke sungai, kanal-kanal dan melalui intrusi. Hal ini menyebabkan garam-garam tanah meningkat dan melebihi batas toleransi tanaman, sehingga pertumbuhan tanaman terganggu dan akhirnya produktivitas tanaman menjadi menurun.

Reklamasi lahan pada lahan bersalinitas diperlukan untuk memperbaiki kualitas lahan, agar produktivitas tanaman dapat ditingkatkan. Perbaikan irigasi dan saluran drainase dapat mempermudah menurunkan garam-garam terlarut melalui proses pencucian. Dengan penggunaan mulsa dari sisa tanaman dapat mengurangi penguapan, sehingga pada saat air berkurang garam-garam tanah tidak muncul dipermukaan tanah. Pembenh tanah seperti gipsum, kompos, pupuk kandang dan jenis bahan organik mampu menurunkan kadar Na dan EC tanah, sehingga salinitas menjadi turun. Pemilihan tanaman yang toleran terhadap tanah salin sangat diperlukan, agar terhindar dari gagal panen. Pembuatan bendungan karet yang diterapkan pada sungai dekat pesisir dapat membendung intrusi air laut.

Daftar Pustaka

- ADB 2009. The Economics of Climate Change in Southeast Asia: A Regional Review. Asian Development Bank, Manila.
- Akhter J., K Mahmood, K.A. Malik, S. Ahmed and R. Murray. 2003. Amelioration of a saline sodic soil through cultivation of a salt-tolerant grass *Leptochloa fusca*. *Environmental Conservation* 30 (2): 168-174.
- Balittanah. 2013. Identifikasi dan Penanganan Gagal Panen Padi pada Lahan Sawah di Sekitar PT Pertamina EP Region Jawa Field Tambun-Bekasi. Laporan Akhir Kerjasama Penelitian. Balittanah, Balai Besar Litbang Sumberdaya lahan pertanian, Badan Litbang, Kemtan. (Tidak dipublikasikan).
- Ilalpa A.M. 1995. Management of Problem Soils in Arid Ecosystems. 272 pages. English. CRC Press.
- Boer, R., A. Buono, A. Sumaryanto, E. Surmaini, I. Las, dan Yelly. 2011. Dampak Kenaikan Muka Air Laut pada Penggunaan Lahan Sawah di Kawasan pantura. Laporan Akhir Konsorsium Penelitian dan Pengembangan Perubahan Iklim Sektor Pertanian. Kementerian Pertanian. (Tidak dipublikasikan).
- Brady, N. and R. Weil. 2002. The Nature and Properties of Soils, 13th Edition. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. 960 p.
- Brinkman, R. and Singh V.P. 1982. Rapid Reclamation of Brackish Water Fishpond in Acid Sulphate Soil. ILRI. Publ. Wageningen. Netherlands. P:318-330.
- Cardon G.E., J.G. Davis, T.A. Bauder, and R.M.Waskom. 2013. Managing Saline Soils no. 0.503. www.Colostate.edu di akses 13 Maret 2014.
- Dobermann, A. and Fairhurst, T. 2000. Nutrient Disorder And Nutrient Management. International Rice Research Institute. Potash and Phosphat Institute of Canada. P:139-144.
- Erfandi D, A. Rachman, dan A. Dariah. 2006. Rehabilitasi lahan, sifat-sifat tanah, dan salinitas tanah pada lahan pertanian pasca tsunami. Prosiding Seminar Nasional Sumberdaya Lahan Pertanian. Bogor, 14-15 September 2006. Buku II: 543-554 dalam Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian, Badan Litbang. Departemen Pertanian.
- Erfandi D. and A. Rachman. 2011. Identification of soil salinity due to seawater intrusion on rice field in the Northern Coast of Indramayu, West Java. *J Trop Soil* 16(2): : 115-212

- FAO (Food Agriculture Organization). 2005. 20 Things to know about: The Impact of Salt Water on Agricultural Land in Aceh Province. FAO field guide. United Nation Food and Agriculture Organization. FAO, March 2005.
- Foerster, H., T. Sterzel, C.A. Pape, M. Moneo-Lain, I. Niemeyer, R. Boer, and J.P. Kropp. 2011. Sea-Level Rise in Indonesia: On adaptation priorities in the agricultural sector. Accepted for Publication at Regional Environmental Change.
- Gabriel J.L., P. Almendros, C. Hontoria, and M. Quemada. 2012. The role of cover crops in irrigated systems: Soil salinity and salt leaching. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 158: 200-207.
- Gani, A. 2005. Technical Report Following Seed Reconnaissance Mission for the FAO to Nanggroe Aceh Darussalam after Tsunami 26 December 2004. Food and Agriculture Organization of United Nations. Jakarta. 17p.
- Grattan, S.R., Zeng, L., Shannon, M.C., and Roberts, S.R. 2002. Rice is more sensitive to salinity than previously thought. *California Agric.* 56:189-195.
- Gregorio, D.B., Senadhira, D., Mendoza, R.D., Manigbas, N.L., Roxas, J.P., and Guerta, C.Q. 2002. Progress in breeding for salinity tolerance and associated abiotic stresses in rice. *Field Crop Research* 76 (2-3): 91-101.
- Haryono, S., Sutono, U., Kurnia, dan A. Abdurachman. 2003. Pengaruh pemberian bahan organik dan pencucian terhadap hasil padi pada tanah tercemar industri tekstil di rumah kaca. Hal. 231-243 dalam *Providing Seminar Nasional. Peningkatan Kualitas Lingkungan dan Produk Pertanian. Pertanian Produktif Ramah Lingkungan Mendukung Ketahanan dan Keamanan Pangan*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Iskandar, T. dan Chairunas. 2008. Palawija production in tsunami affected soil in the province of Nanggroe Aceh Darussalam. *Proceeding of International Workshop on Post Tsunami Soil Management*. Bogor 1-2 July 2008. Indonesia.
- Jevrejeva, S., J. C. Moore, and A. Grinsted. (2010). How will sea level respond to changes in natural and anthropogenic forcings by 2100? *Geophysical Research Letters* 37 (7): 1-5.
- Krishnamurthy P., K. Ranathunge, R. Franke, H. S. Prakash, Lukas Schreiber, and M. K. Mathew. 2009. The role of root apoplastic transport barriers in salt tolerance of rice (*Oryza sativa* L.). *Planta* 230:119-134.

- Lamond, R.E. and D.A. Whitney. 1992. Management of Saline and Sodic Soil. MF-1022. Cooperative Extension Service, Kansas State University, Manhattan, Kansas. 4 p.
- Luknanto D. 2002. Model Matematik Numeris Bendungan Karet Pencegah Intrusi Air Laut di Sungai Wonokromo, Surabaya. Disampaikan pada: Seminar Peran Model Matematik Dalam Mitigasi Bencana Alam. Yogyakarta, 30 September 2002. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Gajah Mada. <http://uk.staff.ugm.ac.id/riset>. diakses 17 Maret 2014. (Tidak dipublikasikan).
- Maas, E.V. 1984. Salt tolerance of plants. In B.R. Christie (ed.). *Handbook of plant science in agriculture*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Malcon C.V., V.A. Lindley, J.W. O'Leary, H.V. Runciman, and E.G. Barrett-Lennard. 2003. Halophyte and glycophyte salt tolerance at germination and the establishment of halophyte shrubs Saline environments. *Plant and Soil* 253(1): 171-185.
- HoE. 2010. Indonesian Second National Communication under the United National Convention on Climate Change. The Ministry of Environment. Republic of Indonesia.
- Nicholls, R. J. and Mimura, N. 1998. Regional issues raised by sea-level rise and their policy implications. *Climate Research* 11: 5-18.
- Harawan A. dan Y. Haryati. 2008. Peningkatan produksi padi dengan inovasi penggunaan varietas toleran salinitas. Buku II: 1-8 dalam *Pros. Seminar Nasional Sumber Daya Lahan dan Lingkungan Pertanian*. Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian, Badan Litbang Pertanian, Departemen Pertanian.
- Pikiran Rakyat. 2009. Petani Keluhkan Gabah Hampa. 27 Agustus 2009, *Pikiran Rakyat* Bandung. E-PAPER.
- Qadir M., R.H. Qureshi, and N. Ahmad. 1996. Reclamation of a saline-sodic soil by gypsum and *Leptochloa fusca*. *Geoderma* 74 (3-4): 207-217.
- Rachman, A. 2007. Vertical and Lateral Movement of Salt. Training Workshop of soil management for rebuilding agriculture in tsunami affected areas in NAD province. Banda Aceh. P: 37-39.
- Schroter, S. (2007). A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise. *Science* 315: 19-21.

- Wichern J., F. Wichern, and R. G. Joergensen. 2006. Impact of salinity on soil microbial communities and the decomposition of maize in acidic soils. *Geoderma* 137(1-2): 100-108.
- Yan N. and P. Marschner. 2013. Response of soil respiration and microbial biomass to changing. *Soil Biology and Biochemistry* 65: 322-328.
- Zeng, L. and M.C. Shannon. 2000. Effects of Salinity on Grain Yield and Yield Components of Rice at Different Seeding Densities. *Agronomy Journal* 92: 418-423.

7. TEKNOLOGI PENGENDALIAN PENCEMARAN LOGAM BERAT PADA LAHAN PERTANIAN

Deddy Erfandi dan Ishak Juarsah

Peneliti Balitbangtan di Balai penelitian tanah

Pendahuluan

Aktivitas pertanian semakin meningkat sejalan dengan meningkatnya jumlah penduduk. Sementara lahan pertanian produktif semakin sempit. Menurut data BPS (2013) kepemilikan lahan garapan per KK (kepala keluarga) adalah 0,3 ha. Disamping itu lahan pertanian, keberadaannya sudah di kelilingi berbagai infrastruktur termasuk pemukiman, industri, dan fasilitas umum lainnya. Dalam keadaan demikian lahan pertanian sangat terancam produktivitasnya. Kualitas tanah menurun menyebabkan produksi tanaman menurun. Hal ini karena lahan pertanian sudah terkontaminasi oleh bahan pencemar.

Pencemaran lingkungan hidup adalah masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam lingkungan hidup oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu lingkungan hidup yang telah ditetapkan (UU No.32 tahun 2009). Pencemaran terjadi pada tanah, tanaman, air tanah, badan air atau sungai, udara, terputusnya rantai dari tatanan lingkungan hidup atau penghancuran suatu jenis organisme yang pada akhirnya dapat menghancurkan ekosistem (Soemarwoto 1991; Gammon 2011). Lingkungan yang tercemar merupakan keadaan ekosistem yang tidak seimbang akibat masuknya zat pencemar ke dalam lingkungan tersebut. Sedangkan lingkungan alami memiliki ekosistem yang seimbang, seperti udara di pedesaan yang terasa segar karena banyak ditumbuhi pepohonan hijau. Yang menunjukkan di desa itu udaranya belum tercemar. Adapun di kota yang padat penduduknya, udara akan terasa panas dan pernapasan menjadi tidak nyaman. Yang mengindikasikan udara sudah tercemar.

Sumber pencemaran pada lahan pertanian dapat digolongkan ke dalam kegiatan non pertanian dan pertanian. Untuk kegiatan non pertanian termasuk industri, kegiatan penambangan serta rumah tangga. Pencemaran umumnya berasal dari limbah industri, penambangan, rumah tangga. Sedangkan dari kegiatan pertanian berupa penggunaan pupuk, baik pupuk kandang atau kimia, dan pestisida. Menurut Wuana and Okieimen (2011) sumber bahan yang mencemari dan terkontaminasi dalam tanah berasal dari: pestisida, pupuk anorganik, pupuk organik, air limbah pabrik, sisa/limbah pertambangan, dan udara buangan industri termasuk debu dan emisi.

Pesatnya laju pertumbuhan pembangunan terutama di bidang industri, pertanian, dan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, memungkinkan

manusia memanfaatkan berbagai jenis bahan kimia termasuk logam berat untuk memenuhi kebutuhan hidupnya. Pembangunan pabrik-pabrik di sepanjang Daerah Aliran Sungai (DAS) di mana hampir seluruh pabrik-pabrik tersebut membuang limbahnya ke aliran sungai. Hal tersebut mengkhawatirkan masyarakat karena memicu terjadinya perubahan baku mutu di perairan. Pencemaran logam berat sangat berbahaya bagi lingkungan. Banyak laporan yang memberikan fakta betapa berbahayanya pencemaran lingkungan terutama oleh logam berat pada kawasan perairan, baik akibat penggunaan airnya untuk konsumsi sehari-hari maupun ketika mengonsumsi biota air tawar yang hidup di perairan tercemar tersebut. Kasus yang dilaporkan terutama pada pencemaran wilayah sungai termasuk DAS. Hal ini karena sungai merupakan alternatif pembuangan sisa hasil olahan yang berupa limbah. Kasus pada DAS Cikijing yang keberadaannya dikelilingi oleh pabrik tekstil, ternyata konsentrasi logam berat termasuk Cu, Cr dan Zn lebih besar pada sedimen daripada air sungai (Andarani dan Roosmini 2010). Di Teluk Jakarta dilaporkan bahwa pada berapa lokasi logam beratnya sudah tinggi, bahkan sudah melebihi ambang batas (Lestari dan Edward 2004).

Banyaknya limbah yang dihasilkan dari proses industri atau rumah tangga menyebabkan sumber air untuk pengairan mengalami pencemaran. Selanjutnya bahan yang terdiri dari senyawa beracun yang biasa disebut B3 (bahan berbahaya beracun) akan mengendap dalam tanah. Proses ini berulang dengan berjalannya waktu, sehingga terjadi akumulasi bahan tersebut beserta logam beratnya di dalam tanah. Akibatnya akan terjadi perubahan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah yang tidak diinginkan terhadap tanah. Produktivitas tanah menurun, hal ini diikuti dengan kemampuan mendukung pertumbuhan tanaman menjadi turun. Oleh sebab itu, diperlukan teknologi untuk pengendalian pencemaran yang terjadi pada lahan pertanian, agar kondisi tanah yang tercemar dapat berfungsi kembali secara optimal sebagai unsur produksi, media pengatur air, dan sebagai unsur perlindungan alam.

Bahan berbahaya dan beracun (B3) adalah zat, energi, dan/atau komponen lain yang karena sifat, konsentrasi, dan/atau jumlahnya, baik secara langsung maupun tidak langsung, dapat mencemarkan dan/atau merusak lingkungan hidup, dan/atau membahayakan lingkungan hidup, kesehatan, serta kelangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lain (UU. Republik Indonesia No.32 tahun 2009). Logam berat termasuk kedalam B3 yang didefinisikan sebagai suatu kesatuan logam yang mempunyai bobot molekul dan berat jenis lebih besar dari 5 g/cm³ dengan nomor atom antara 22 dan 29 periode III dan IV (Anonim 1977). Menurut Duffus (2002) logam yang berat didefinisikan dengan mempunyai berat jenis lebih besar 3,5 g/cm³ dan bahkan ada yang sampai 7 g/cm³. Namun istilah logam berat ada yang tidak setuju kalau dilihat dari kerapatan berat/berat jenis, karena kerapatan logam tidak ada hubungannya dengan efek logam tersebut terhadap tanaman. Jadi logam berat harus didefinisikan dalam kaitannya dengan posisi dari elemen dalam tabel periodik.

karena posisi ini berkaitan dengan sifat-sifat senyawa kimia senyawa termasuk elemennya (Appenroth 2010). Jenis logam berat diketahui >70 unsur, beberapa diantaranya perlu mendapat perhatian khusus, yaitu Hg, Pb, Cr, Co, Mo, Mn, dan Ni karena mudah terkontaminasi pada tanah dan tanaman (Plotrowski and Coleman 1980).

Tulisan ini membahas mengenai pencemaran logam berat terhadap tanah dan tumbuhan. Hal ini karena tanah bersifat kompleks dan memiliki suatu energi yang hidup dan dinamis serta berhubungan dengan manusia dan hewan. Selain itu dibahas juga sumber pencemaran dan baku mutu lingkungan. Untuk menanggulangi pencemaran dibutuhkan teknologi pengendalian pencemaran, agar lahan pertanian dapat dipertahankan produktivitasnya. Tujuan tulisan ini untuk memberikan pengetahuan tentang pencemaran logam berat dan penanggulangannya, agar produktivitas lahan pertanian dapat berkesinambungan dan lestari.

Sumber Pencemaran Logam Berat dalam Tanah

Tanah mengandung berbagai zat terlarut berbentuk ion, baik kation maupun anion. Kation yang umum terdapat dalam larutan tanah ialah H⁺, Al³⁺, Fe³⁺ (dalam suasana aerob), Fe²⁺ (dalam suasana anaerob) Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺ dan NH₄⁺. Anion yang umum dijumpai ialah SiO₄⁴⁻ dari asam monosilikat, NO₃⁻, ortofosfat primer H₂PO₄⁻ atau ortofosfat sekunder HPO₄²⁻ dan SO₄²⁻. Larutan tanah juga mengandung partikel-partikel koloid terdispersi berupa koloid anorganik (lempung) dan koloid organik (karbohidrat, asam amino, protein, bakteri, dan algae). Sedangkan gas-gas yang terlarut dalam larutan tanah ialah CO₂ dan O₂.

Logam Tembaga, Seng, Kadmium, dan Timbal merupakan bahan pencemar tanah. Sumber bahan pencemar tanah dapat dipilah menjadi dua, yakni bahan anorganik dan bahan organik. Bahan anorganik terutama logam berat seperti seng, tembaga, timbal, dan arsenikum. Bahan-bahan tersebut cenderung berada di dalam tanah dalam waktu yang lama, meskipun status kimianya kemungkinan berubah menurut waktu.

Berbagai sumber dan penyebab pencemaran yang dapat mengakibatkan menurunnya kualitas tanah di antaranya penggunaan bahan-bahan agrokimia, limbah industri, kegiatan pertambangan dan limbah rumah tangga. Dengan mengetahui sumber dan penyebab pencemaran terutama yang terjadi pada lahan pertanian, maka upaya pencegahan dan penanggulangannya dapat diterapkan secara lebih tepat dan terarah.

Bahan Agrokimia

Pupuk

Pertanian merupakan kegiatan besar pertama manusia yang mempengaruhi tanah. Melalui siklus hidup, tanaman dapat tumbuh dengan hara makro (N, P, K, S, Ca, dan Mg) dan mikro. Pada beberapa tanah terjadi kekurangan logam berat yang penting seperti Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, dan Zn untuk pertumbuhan tanaman yang normal (Lasat 2000). Untuk itu pemberiannya dapat diberikan melalui tanah atau daun. Sebagai contoh tanaman sereal ditanam pada tanah miskin Cu, sehingga perlu ditambahkan Cu, begitu juga bila kekurangan Mn. Sejumlah besar pupuk N, P, dan K diberikan secara teratur ke dalam tanah pada sistem pertanian intensif dalam rangka untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman. Senyawa-senyawa yang digunakan pada pupuk tersebut mengandung logam berat (misalnya Cd dan Pb). Logam berat tersebut dapat meningkat di dalam tanah sejalan dengan peningkatan penggunaan pupuk. Logam, seperti Cd dan Pb, diketahui tidak memiliki aktivitas/fungsi fisiologis. Aplikasi pupuk fosfat tertentu secara tidak sengaja menambahkan Cd dan elemen lainnya yang berpotensi beracun ke dalam tanah, seperti F, Hg, dan Pb (Raven *et al.* 1998). Berbagai jenis pupuk anorganik dan pupuk yang berasal dari batuan fosfat mengandung logam berat (Tabel 1 dan 2).

Tabel 1. Kandungan logam berat dalam beberapa jenis pupuk anorganik.

Logam berat	Pupuk P	Pupuk N
	mg/kg	
Arsen	2-1.200	2,2-120
Boron	5-115	-
Kadmium	0,1-170	0,05-8,5
Kobalt	1-12	5,4-12
Kromium	66-245	3,2-19
Tembaga	1-300	-
Air Raksa	0,01-1,2	0,3-2,9
Timah (Timbal)	40-2.000	-
Mangan	0,1-60	1-7
Molibdenum	7-38	7-34
Nikel	7-225	227
Selenium	0,5	-
Uranium	30-300	-
Vanadium	2-1.600	1-42
Seng	50-1450	-

Sumber: Setyorini *et al.* 2003

Tabel 2. Logam berat dalam berbagai jenis batuan fosfat alam (PA) dan SP-36

Asal batuan fosfat	Cd	Cr	Pb
		mg/kg.....	
PA Christmast	38	-	60
PA Tunisia	76	-	42
PA Maroko	57	-	113
PA Jordan	5	344	tu
PA Senegal	113	-	55
PA China Huanan	3	-	tu
PA Oamisi	28	20	tu
PA Sukabumi	65	-	65
SP-36	11	4	Tu

Sumber: Setyorini *et al.* 2003; tu= tidak terukur

Pestisida

Umumnya pestisida yang digunakan cukup luas di bidang pertanian dan hortikultura memiliki kandungan logam berat. Di Inggris misalnya sekitar 10 % pestisida mengandung senyawa Cu, Hg, Mn, Pb, atau Zn. Sebagai contoh pestisida seperti fungisida yang mengandung tembaga seperti campuran Bordeaux (tembaga sulfat) dan tembaga oksiklorida (Jones and Jarvis 1981). Timbal arsenat digunakan dalam kebun buah-buahan selama bertahun-tahun untuk mengendalikan beberapa serangga parasit. Senyawa yang mengandung arsenik juga digunakan secara luas untuk mengendalikan kutu sapi dan untuk mengendalikan hama pisang di Selandia Baru dan Australia. Disamping itu untuk pengawetan kayu dengan menggunakan formulasi dari Cu, Cr, dan As, sehingga saat ini banyak tanah tercemar akibat konsentrasi logam berat yang berlebihan (McLaughlin *et al.* 2000).

Di Indonesia penggunaan pestisida pada tanaman sayuran sangat intensif, khususnya pada tanaman yang memiliki ekonomis tinggi. Berdasarkan penelitian 30-50% dari total biaya produksi digunakan untuk pestisida (Badan Litbang Pertanian 1992). Penggunaan pestisida yang intensif dapat meninggalkan residu di dalam tanah dan tanaman, bahkan dapat masuk ke dalam tubuh hewan, ikan, atau biota air lainnya. Pestisida dengan waktu paruh (half life time) degradasi yang lama dapat membahayakan kesehatan manusia dan makhluk hidup yang mengonsumsi produk yang mengandung residu pestisida tersebut.

Pupuk kandang, kompos, sampah/limbah kota

Pemecahan berbagai bahan organik misalnya pupuk kandang, kompos, dan sampah/limbah kota secara tidak langsung berkontribusi pada akumulasi logam berat dalam tanah. Contoh logam berat tersebut adalah As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Se, Mo, Zn, Ti, Sb, dan sebagainya (Basta *et al.* 2005). Kotoran hewan ternak seperti unggas, sapi, babi dan pupuk yang dihasilkan di bidang

pertanian umumnya diterapkan pada tanaman dan padang rumput sebagai padatan atau cairan. Pupuk kandang yang mengandung logam berat, jika berulang kali dan dalam jangka panjang diterapkan dapat menyebabkan terjadinya akumulasi logam berat dalam tanah.

Limbah organik (biosolid) merupakan produk padat dari bahan organik, yang diproduksi melalui proses pengolahan air limbah dan dapat didaur ulang (US EPA 1994). Amerika Serikat diperkirakan lebih dari 50% sekitar 5,6 juta ton limbah kering digunakan atau disebar setiap tahunnya pada lahan. Selain itu pemanfaatan biosolid diterapkan pada lahan pertanian di setiap wilayah negara bagian. Dalam masyarakat Eropa, lebih dari 30% dari limbah ini digunakan sebagai pupuk dalam pertanian (Silveira 2003). Di Australia lebih dari 175 000 ton biosolid kering yang diproduksi setiap tahun oleh pemerintah daerah (McLaughlin *et al.* 2000). Bahan biosolid lainnya adalah serbuk gergaji, jerami padi/jagung, atau sisa tanaman.

Penerapan biosolid yang berlanjut, dapat menyebabkan terjadinya kontaminasi logam berat terhadap tanah. Logam berat yang paling umum ditemukan di biosolid adalah Pb, Ni, Cd, Cr, Cu, Zn, dan konsentrasi logam berat tergantung dari intensitas kegiatan industri. Penerapan biosolid dalam tanah dapat tercuci masuk ke dalam profil tanah dan memiliki potensi untuk mencemari air tanah (McLaren *et al.* 2005). Penelitian biosolid yang diterapkan pada beberapa tanah di Selandia Baru telah menunjukkan peningkatan konsentrasi Cd, Ni, dan Zn dalam air drainase (Keller *et al.* 2002; McLaren *et al.* 2004).

Beberapa kadar logam berat yang terdapat dalam pupuk kandang, kompos, dan kapur (Tabel 3).

Tabel 3. Kadar logam berat dalam pupuk kandang, kompos dan kapur

Logam berat	Pupuk kandang	Kompos	Kapur
		mg/kg	
Arsen	3-25	2-52	0,1-25
Boron	0,3-0,6	-	10
Kadmium	0,1-0,8	0,01-100	0,04-0,1
Kobalt	0,3-24	-	0,4-3
Kromium	1,1-55	1,8-4,110	10-15
Tembaga	2-172	13-3.580	2-125
Air Raksa	0,01-0,36	0,09-21	0,05
Timah (Timbal)	30-969	-	40-1.200
Mangan	0,05-3	-	0,1-115
Molibdenum	2,1-30	0,9-279	0-20
Nikel	1,1-27	1,3-2.240	20-1.250
Selenium	2,4	-	0,08-0,1
Uranium	-	-	20
Vanadium	-	82-5.894	10-450
Seng	15-566	-	-

Sumber: Setyorini *et al.* (2003)

Limbah Industri

Limbah cair

Di dunia, diperkirakan bahwa 20 juta hektar lahan pertanian dialiri dengan air limbah, baik dari industri atau rumah tangga. Di beberapa kota di Asia dan Afrika, studi menunjukkan bahwa pertanian berbasis irigasi air limbah menyumbang 50 persen dari pasokan sayuran ke daerah perkotaan (Bjuhr 2007). Petani umumnya kurang peduli tentang manfaat atau bahaya lingkungan, yang terpenting memaksimalkan hasil dan keuntungan. Meskipun konsentrasi logam berat dalam air limbah biasanya relatif rendah. Namun dalam jangka panjang irigasi akhirnya dapat mengakibatkan akumulasi logam berat dalam tanah. Di Indonesia pencemaran logam berat sudah terindikasi pada daerah aliran sungai (DAS). Menurut Mulyadi *et al.* (2010) tanah sawah di wilayah DAS Dolo hilir telah tercemar Pb. Air irigasi limbah pabrik kertas yang digunakan untuk pengaliran telah mencemari tanah dengan Cu, Pb, dan Cd (Sutrisno dan Mulyad 2008). Begitu juga terhadap Sub DAS Juwana yang terindikasi pencemaran Cr (Artanti *et al.* 2010). Logam berat Cr sangat potensial mencemari lahan pertanian, hal ini karena pengalirannya menggunakan air limbah industri gula (Suhardjo 2010).

Industri dalam proses produksinya menggunakan bahan baku utama dan bahan baku penunjang. Di antara bahan baku yang digunakan ada yang mengandung logam berat (Tabel 4), sehingga limbah yang dihasilkan dapat mengandung unsur-unsur yang sama seperti bahan bakunya. Para pelaku industri biasanya membuang limbah ke dalam badan air atau sungai tanpa melalui proses pengolahan limbah terlebih dahulu. Air sungai atau badan air tersebut dimanfaatkan oleh petani sebagai air irigasi untuk mengairi lahan pertanian atau sawah mereka. Hal inilah terjadi pencemaran dan apabila berlanjut akan terakumulasi logam berat yang berbahaya bagi tanah dan tanaman.

Tabel 4. Jenis-jenis industri yang bahan bakunya menghasilkan logam berat

Jenis industri	Hg	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn	Ni	Al	Fe	Co	Mn
Pabrik/pesin	+	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-
Farmasi/kosmetik	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-
Kayu	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Industri tekstil/kontrol/ukur	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Industri kimia/elektrik	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Industri pelat/pelapang	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-
Industri besi/karat	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yasak	+	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-
Korosi	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-
Pengolahan kulit	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-
Pasir dan kerikil	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Batu bara dan arca	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	+
Industri pabean	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	-
Industri produk logam	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+
Industri	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-

Sumber: Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat (2000).

+ ada, - tidak ada

Pertambangan

Pertambangan dan industri pengolahan bijih logam pada banyak negara telah mewariskan kontaminasi logam dalam tanah yang cukup luas. Mekanisme pengolahan bijih tergantung pada jenis tambang. Umumnya pengolahan bijih terdiri dari proses *benefication* dimana bijih yang ditambang diproses menjadi konsentrat bijih untuk diolah lebih lanjut atau dijual langsung. Proses *benefication* umumnya terdiri dari kegiatan persiapan, penghancuran dan atau penggilingan, peningkatan konsentrasi dengan gravitasi atau pemisahan secara magnetis atau dengan menggunakan metode *flotasi* (pengapungan), yang diikuti dengan *dewatering* dan penyaringan. Hasil dari proses ini adalah konsentrat bijih dan limbah dalam bentuk *tailing* serta emisi debu. *Tailing* biasanya mengandung bahan kimia sisa proses dan logam berat.

Kegiatan pertambangan sangat potensial menimbulkan dampak pada tanah dan badan air serta tidak menguntungkan bagi lahan pertanian. Kegiatan penambangan seperti barubara, emas, minyak bumi, potensial menimbulkan dampak negatif. Dari pertambangan, bahan pencemar tidak ditambang secara tersendiri, tetapi merupakan bahan ikutan dari pengolahan tambang dan produksi timah hitam (Pb), Seng (Zn), Kuprum (Cu), batubara, dan minyak. Dalam penambangan emas penggunaan Hg untuk memisahkan bijih emas dapat sebagai penyebab pencemaran badan air dan lahan pertanian. Penelitian di Gunung Pongkor Bogor diketahui bahwa merkuri (Hg) telah mencemari tanah dan air persawahan (Mulyadi *et al.* 2008). Kandungan logam yang tinggi dijumpai di air dan sedimen kolong atau danau bekas tambang antara lain Fe, Al, Pb, Zn, Cd, dan Cu (Shevenell *et al.* 1999; Eary 1999).

Pada areal bekas tambang timah di Bangka yang berbentuk kolong, memiliki kandungan logam seperti Pb, Fe, As, Al, dan Zn yang melebihi baku mutu air bersih (Henny dan Susanti 2009). Selain itu pada kegiatan tambang konvensional (TI) apung dapat meningkatkan kandungan logam Pb dan bahkan melebihi baku mutu Kemen No. 51/MENLH/2004. Begitu juga menurut Kurniawan (2013) bahwa air laut di pesisir Kabupaten Bangka telah tercemar logam Pb, Cd dan Cr yang cukup tinggi. Hal ini berdampak pada plangton serta lahan disekitarnya (Wahyuni *et al.* 2013).

Baku Mutu Lingkungan

Baku mutu lingkungan hidup adalah ukuran batas atau kadar makhluk hidup, zat, energi, atau komponen yang ada atau harus ada dan/atau unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya dalam suatu sumber daya tertentu sebagai unsur lingkungan hidup. Sedangkan menurut USDA (2003) indikator mutu tanah adalah sifat fisik, kimia dan biologi tanah serta proses dan karakteristik yang dapat diukur untuk memantau berbagai perubahan dalam tanah. Indikator mutu tanah akan menentukan kemampuan tanah untuk memenuhi fungsinya. Menurut

Larson dan Pierce (1994) tiga fungsi tanah yang berhubungan erat dengan mutu tanah adalah sebagai media pertumbuhan tanaman, mengatur dan membagi aliran air melalui lingkungan dan bertindak sebagai penyanggah lingkungan. Menurut Lel *et al.* (1997) total logam berat dalam tanah sangat tergantung dari kandungan kat dimana kandungan Co, Cu, Ni, Pb, dan Zn sekitar 96 % terdapat pada fraksi liat. Selanjutnya Chlopercka *et al.* (1996) mendapatkan bahwa besarnya pencemaran Pb, Cd, dan Zn secara jelas dimodifikasi oleh pH tanah. Pada pH < 5,6 kandungan Pb, Cd, dan Zn lebih banyak dalam bentuk dapat dipertukarkan dibanding pada pH > 5,6.

Untuk mengetahui pencegahan dan penanggulangan pencemaran logam berat yang mencemari lingkungan sangat penting diketahui batas/nilai ambang logam. Nilai ambang logam berat yang tercemar dalam tanah berbeda pada masing-masing negara. Namun ada beberapa hasil penelitian yang dapat dijadikan sebagai acuan untuk tindakan reklamasi lahan. Pada Tabel 5 dicantumkan data kisaran nilai ambang logam berat dalam tanah (Pickering 1980). USDA membuat standar nilai ambang untuk industri yang limbahnya akan dibuang ke lahan pertanian (Tabel 6). Limbah tersebut dibuang dalam bentuk padatan (*sludge*), karena lebih mudah dalam pencegahan dan membersihkan lahan dari kontaminasi logam berat. Kementerian ESDM Republik Indonesia mengeluarkan peraturan No. 045 tahun 2006 tentang limbah lumpur pada kegiatan pengeboran minyak dan gas bumi (Tabel 7). Baku mutu produk atau hasil pertanian dari lahan pertanian yang tercemar sangat diperlukan, agar aman bagi konsumen. Oleh karena batas kritis/ambang batas pencemaran pada tanah, air, tanaman, dan produk pertanian belum ada atau belum ditetapkan untuk kondisi Indonesia. Dalam Tabel 8 tertera ambang batas yang dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk mengingatkan telah terjadi pencemaran pada suatu daerah, sehingga arahan penanggulangannya dapat ditetapkan. Hal untuk standarisasi mutu lingkungan, agar lingkungan hidup terjaga terutama sungai dan lahan pertanian.

Tabel 5. Kisaran logam berat dalam tanah

Logam berat	Nilai ambang dalam tanah (ppm)
As	0,1-4,0
B	2-100
F	30-300
Cd	0,1-7,0
Mn	100-4000
Ni	10-1000
Zn	10-300
Cu	2-100
Pb	2-200

Sumber: Pickering (1980)

Tabel 6. Ambang batas logam berat yang diterapkan pada tanah (US. EPA 1993).

Logam Berat	Konsentrasi maksimum bahan pencemar	Rata-rata tahunan bahan pencemar	Kumulatif bahan pencemar
	ppm	Kg/ha/th	Kg/ha
Arsenic	75	2	41
Cadmium	85	1,9	39
Chromium	3000	150	3000
Copper	4300	75	1500
Lead	420	21	420
Mercury	840	15	300
Molybdenum	57	0,85	17
Nickel	75	0,90	18
Selenium	100	5	100
Zinc	7500	140	2800

Tabel 7. Baku mutu TCLP (*toxicity characteristic leaching procedure*) logam berat limbah lumpur

Logam Berat	Baku mutu mg/l
Arsen	5,0
Barium	100,0
Cadmium	1,0
Chromium	5,0
Copper	10,0
Lead	5,0
Mercury	0,2
Selenium	1,0
Silver	5,0
Zinc	50,0

Sumber: ESDM 2006

Tabel 8. Batas kritis unsur-unsur logam berat dalam tanah, air, tanaman, dan beras

Unsur logam berat	Tanah ¹	Air ²	Tanaman ³	Beras/tepung ⁴
	ppm			
Pb	100	0,03	50	1,0
Cd	0,50	0,05-0,10	5-30	0,5
Co	10	0,4-0,6	15-30	-
Cr	2,5	0,5-1,0	5-30	-
Ni	20	0,2-0,5	5-30	-
Cu	60-125	2-3	20-100	10
Mn	1.500	-	-	-
Zn	70	5-10	100-400	40

Sumber: ¹Ministry of State for Population and Environment of Indonesia, and Dalhousie University, Canada (1992).²Pemerintah Republik Indonesia (1990).³Alloway (1995).⁴Direktorat Jenderal Pengawasan Obat dan Makanan (1989).

Dampak Terhadap Tanah dan Tanaman

Dampak negatif lain dari logam berat pada tanah adalah keracunan pada proses biologi meliputi berbagai proses yang dikatalisasi oleh mikroorganisme. Komunitas mikrobial dapat dijadikan indikator hilangnya atau berubahnya kualitas tanah akibat tercemar logam berat atau perubahan mutu tanah. Hal ini dapat terjadi pada penggunaan agrokimia yang berlebihan seperti pupuk dan pestisida, begitu juga akibat dari kegiatan penambangan.

Penggunaan pupuk yang digunakan dalam budidaya pertanian dapat menyebabkan pencemaran pada tanah, karena pupuk tersebut mengandung logam berat. Dalam pertumbuhannya, tanaman menyerap unsur hara dari dalam tanah, termasuk logam berat, sehingga produk atau hasil pertanian dapat mengandung logam berat. Kondisi seperti ini akan berdampak buruk terhadap kesehatan konsumen. Sampai saat ini, belum ada nilai ambang batas konsentrasi logam berat di dalam tanah yang aman bagi produk pertanian yang dihasilkan. Oleh sebab itu, sekecil apapun konsentrasi logam berat, baik di dalam tanah maupun dalam produk/hasil pertanian harus mendapat perhatian yang serius.

Pestisida yang digunakan dalam budi daya pertanian meninggalkan residu pada tanah, air, biji atau buah, dan tanaman, bahkan sampai badan air/sungai dan perairan umum. Namun demikian dalam konsentrasi sangat rendah, logam berat akan terakumulasi di dalam tubuh makhluk hidup, dan lambat laun akan

berpengaruh buruk terhadap kesehatan. Manusia yang mengonsumsi hasil atau produk pertanian yang mengandung residu pestisida, dalam jangka panjang diperkirakan akan terkena dampak berupa kanker (sebagian besar pestisida bersifat karsinogenik), gangguan metabolisme steroid akibat *endocrine disrupting pesticides (EDPs)*, fungsi tiroid, spermatogenesis, hormon gonadotropik, aktivitas oestrogenik, dan aktivitas anti-androgenik.

Bahan senyawa kimia pestisida merupakan bahan pencemar tanah yang dapat bertahan selama beberapa dekade. Penggunaan pestisida dapat mengurangi keragaman hayati di permukaan tanah. Tanah yang tidak menggunakan pestisida diketahui memiliki kualitas yang lebih baik, dan mengandung kadar bahan organik yang lebih tinggi sehingga meningkatkan kemampuan tanah dalam menahan air. Hal ini diketahui memiliki dampak positif terhadap hasil pertanian di musim kering. Selain itu telah diketahui bahwa pertanian organik menghasilkan 20-40% lebih banyak dibandingkan pertanian konvensional ketika musim kering berlangsung. Bahan organik mampu mengikat pestisida dan dapat mempercepat proses pelapukan bahan kimia pestisida.

Tingkat degradasi dan pengikatan merupakan faktor yang mempengaruhi tingkat penggunaan pestisida di tanah. Semua ini tergantung pada sifat kimiawi pestisida, dan proses mengendalikan aliran pestisida dari tanah ke air secara langsung. Pengikatan mempengaruhi bioakumulasi pestisida yang tingkat aktivitasnya bergantung pada kadar organik tanah. Asam organik yang lemah diketahui memiliki kemampuan mengikat tanah yang rendah akibat tingkat kemasaman dan struktur tanah. Bahan kimia yang telah terikat oleh partikel tanah juga telah diketahui memiliki dampak yang rendah bagi mikroorganisme, dan bahan organik tanah dapat mempercepat pengikatan tersebut. Mekanisme penyimpanan dan pelapukan pestisida di tanah masih belum diketahui banyak, namun lamanya waktu singgah (*residence time*) di tanah sebanding dengan peningkatan resistensi degradasi pestisida.

Pencemaran tanah oleh Pb lebih luas dibandingkan logam berat lainnya. Hal ini karena sumbangan terbesar adalah dari sumber antropogenik. Dari hasil penelitian (Hu *et al.* 2013) diketahui bahwa Mn, Co, Fe, Cr, dan Ni di permukaan tanah terutama berasal dari sumber lithogenic. Sedangkan Hg dan As di tanah dikendalikan oleh sumber lithogenic dan antropogenik. Daerah urban lebih beresiko terkena dampak pencemaran logam berat dibandingkan dengan daerah industri. Hasil ini menunjukkan kebutuhan yang signifikan untuk pengembangan strategi pencegahan pencemaran dan pengurangan pencemaran logam berat untuk daerah yang mengalami industrialisasi dan urbanisasi cepat. Akumulasi logam berat dapat menurunkan kualitas tanah, mengurangi hasil panen dan kualitas produk pertanian, dan sehingga berdampak negatif terhadap kesehatan manusia, hewan, dan ekosistem (Nagajyoti *et al.* 2010). Dengan mengidentifikasi sumber dan mengukur konsentrasi logam berat, serta variasi spasial dalam tanah, maka dapat diketahui penanggulangannya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beberapa parameter aktivitas mikroba dapat digunakan

sebagai indikator untuk melihat peningkatan konsentrasi Cd, Pb, dan Zn dalam tanah (Smejkalova *et al.* 2003).

Pertambangan emas meningkatkan air limbah dengan konsentrasi tinggi pada Fe, Zn, dan Al. Selain itu air sungai terkontaminasi dengan Al pada konsentrasi tinggi. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa beberapa logam beracun dapat diserap oleh tanaman (Wahab and Marikar 2012). Hal ini menunjukkan imobilisasi logam yang signifikan. Hasil penelitian Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat (2000) di sekitar areal pertambangan emas Gunung Pongkor, Bogor menunjukkan bahwa tanah-tanah pada lahan sawah yang berada pada jalur aliran Sungai Cikamiki dan Sungai Cisarua telah tercemar limbah pendulangan emas yang mengandung Hg, dengan konsentrasi cukup tinggi (Undang Kurnia *et al.* 2004). Tanaman padi sawah dengan konsentrasi Hg di dalam tanah tinggi, tidak menimbulkan gangguan/kerusakan morfologis tanaman. Akan tetapi, bila tanah mengandung Hg tinggi, jerami dan beras yang dihasilkan dari tanah tersebut cenderung mengandung Hg yang tinggi pula.

Pertambangan minyak bumi yang berada di lahan pertanian atau sekitarnya dapat menyebabkan kerusakan tanaman. Salah satu contoh dampak tersebut adalah meluapnya limbah pengeboran minyak bumi yang terjadi di Desa Sukamaju, Kecamatan BKL Terawas, Kabupaten Muli Rawas, Sumatera Selatan pada tahun 1986 yang menyebabkan kerusakan tanaman padi. Luas dan tingkat kerusakan tanaman padi mencapai 6,25 ha berat, 31,50 ha sedang, dan 15,50 ha ringan. Meskipun luas sebaran dampak relatif kecil, namun pengaruhnya terhadap hasil gabah cukup signifikan. Hasil gabah pada lahan sawah dengan tingkat kerusakan berat hanya mencapai 0,2 t/ha, sedangkan hasil gabah pada lahan sawah dengan tingkat kerusakan sedang 3-4 t/ha. Hasil gabah normal dari lahan sawah di areal tersebut sekitar 6,5-7,0 t/ha (Sukmana *et al.* 1986). Gabah yang dihasilkan dari lahan sawah tercemar berat mudah hancur saat digiling. Dikuga, pencemaran tersebut menyebabkan terhambatnya proses fotosintesis, dan masuknya senyawa hidrokarbon ke dalam jaringan tanaman.

Kegiatan penambangan batu bara dapat menyebabkan terlepasnya unsur kimia tertentu seperti Fe dan S dari senyawa pirit (Fe_2S_3), menghasilkan asam tambang yang dapat hanyut terbawa aliran permukaan pada saat hujan, dan masuk ke lahan sawah di bagian hilir areal pertambangan, sehingga menyebabkan kemasaman tanahnya lebih tinggi. Tanah dan air asam tambang tersebut sangat masam, dengan pH berkisar antara 2,5-3,5 yang berpotensi mencemari lahan pertanian. Selain menghasilkan asam tambang yang dapat memasamkan tanah, penggalian tanah dan batu-batuan yang menutup lapisan batu bara dilakukan secara tidak terkendali, dan penumpukan hasil galian (*overburden*) tidak mengikuti prosedur yang telah ditetapkan pemerintah. Akibatnya lahan dengan tumpukan tanah, dan batu-batuan eks pertambangan sangat sulit untuk ditumbuhi vegetasi.

Teknologi Pengendalian Pencemaran

Umumnya masyarakat menganggap bahwa pencemaran itu selalu identik dengan pengaruh logam berat dan B_3 yang berdampak terhadap kesehatan manusia, hewan, kualitas udara, perubahan iklim dan pencemaran badan air atau sungai dan perairan umum, dan lain-lain. Dampak pencemaran terhadap lahan pertanian masih sangat sedikit mendapat perhatian dan masih terbatasnya upaya pengendalian yang dilakukan, padahal dengan tercemarnya lahan-lahan pertanian berarti hasil atau produk pertanian dari lahan tersebut juga ikut tercemar. Oleh sebab itu, pengendalian pencemaran lingkungan pertanian terhadap lahan pertanian harus mendapatkan perhatian secara serius. Dengan mengetahui sumber dan penyebab pencemaran pada lahan pertanian, maka dapat dilakukan dengan segera langkah awal yang harus dilakukan dalam mengendalikan pencemaran.

Remediasi Kontaminasi Logam Berat Pada Tanah

Sejumlah teknologi remediasi telah dikembangkan untuk tanah terkontaminasi logam berat seperti penggalian tanah, ekstraksi panas untuk logam yang mudah menguap (misalnya merkuri, arsen dan kadmium serta senyawa yang dapat menguap pada 800°C), elektrokinetik, pembekuan/stabilisasi, vitrifikasi, oksidasi kimia, dan tanah disiram dengan chemical extractants (Mulligan *et al.* 2001). Teknologi spesifik yang dipilih untuk pengendalian pencemaran tergantung dari spesiasi kontaminan dan karakteristik spesifik lainnya. Pertimbangannya adalah bahwa metode yang dipilih tidak meninggalkan residu beracun dan pendekatannya harus bersamaan untuk lebih efisien dan hemat biaya pengendalian (Evanko dan Dzombak 1997).

Ada beberapa teknologi untuk remediasi tanah logam berat terkontaminasi. Gupta *et al.* (2000) telah mengklasifikasikan teknologi remediasi tanah yang terkontaminasi ke dalam tiga kategori: (1) *in situ* remediasi ringan; (2) *in situ* remediasi berat pada tanah dengan pembatasan; dan (3) *in situ* atau *ex situ* berat dengan tindakan destruktif. Tujuan dari dua langkah terakhir adalah pengendalian berat, maksudnya untuk mencegah bahaya baik manusia, tumbuhan, atau hewan. Sedangkan tujuan utama dari *in situ* remediasi ringan adalah untuk mengembalikan kesuburan tanah yang aman, bebas kontaminasi logam. Berdasarkan USEPA (1997) teknologi remediasi untuk tanah yang terkontaminasi ke dalam klasifikasi: (1) kontrol sumber dan (2) Penanggulangan. Sumber kontrol melibatkan *in situ* dan *ex situ* teknologi penanggulangan sumber kontaminasi. *In situ* atau di tempat berarti bahwa tanah yang terkontaminasi diperlakukan di tempat asalnya. Dalam teknologi pengolahan *in situ* penanggulangan atau menghilangkan kontaminan dari tanah tanpa melakukan penggalian atau pemindahan tanah. *Ex situ* berarti bahwa tanah yang

terkontaminasi dipindahkan, digali, atau diambil di bawah permukaan tanah. Remediasi dalam tulisan ini berfokus pada mencuci tanah, fitoremediasi, dan teknik imobilisasi karena teknik ini cukup baik untuk mengatasi kontaminasi logam berat (Wuana and Okiemen 2011).

Teknik Imobilisasi

Teknik imobilisasi *in situ* dan *ex situ* adalah pendekatan praktis remediasi logam untuk tanah terkontaminasi. Teknik *ex situ* diterapkan pada tanah yang sangat terkontaminasi dan tanahnya harus dipindahkan dari tempat asalnya, dan penyimpanan berhubungan dengan risiko tinggi ekologi. Keuntungan metode ini adalah: (1) mudah dan cepat penerapan dan (2) biaya operasi dan investasi yang relatif rendah. Kelemahan metode meliputi (1) *invasivity* (gangguan) tinggi terhadap lingkungan; (2) Jumlah limbah padatan besar (dua kali lebih besar volume setelah pengolahan); (3) produk sampingan harus disimpan pada lokasi khusus penimbunan limbah; (4) terjadi perubahan sifat fisikokimia pada produk samping, bahaya serius pelepasan kontaminan tambahan pada lingkungan; dan (5) diperlukan kontrol permanen dari limbah yang disimpan. Di dalam teknik *in situ*, penerapan tanpa menggali tanah. Keuntungan teknik ini adalah (1) *invasivity* rendah; (2) sederhana dan cepat; (3) biaya relatif murah; dan (4) limbah yang dihasilkan relative kecil; (5) penerimaan publik yang tinggi; (6) mencakup spektrum yang luas polutan anorganik. Kelemahan dalam imobilisasi *in situ* adalah (1) hanya solusi sementara (kontaminan masih dalam lingkungan); (2) aktivasi polutan dapat terjadi ketika sifat fisikokimia tanah berubah; (3) proses reklamasi diterapkan hanya pada lapisan permukaan tanah (30-50 cm); dan (4) diperlukan pemantauan permanen (Martin and Ruby 2004; USEPA 1997). Teknologi Imobilisasi sering menggunakan amandemen organik dan anorganik untuk mempercepat pelemahan mobilitas logam dan racun dalam tanah. Peran utama dari amandemen imobilisasi adalah untuk mengubah logam tanah asli lebih stabil fase geokimia melalui penyerapan, curah hujan, dan proses kompleksasi (Hashimoto *et al.* 2009). Pengendalian pencemaran logam berat banyak dilakukan dengan tanah liat, semen, zeolit, mineral, fosfat, kompos organik, dan mikroba. Penelitian terbaru telah menunjukkan potensi residu industri murah seperti lumpur merah (Boisson *et al.* 1999; Lombi *et al.* 2002) dan kermitaria (Anoduadi *et al.* 2009) di imobilisasi logam berat dalam tanah yang terkontaminasi. Sampai saat ini mekanisme imobilisasi masih terbatas teknik analisisnya dan belum banyak diklarifikasi. Hal ini mencakup presipitasi, adsorpsi kimia dan pertukaran ion serta reaksi redoks. Sebagian besar teknologi imobilisasi dapat dilakukan *ex situ* atau *in situ*. *In situ* proses lebih disukai karena rendah tenaga kerja dan kebutuhan energi, tetapi pelaksanaan *in situ* bergantung dari kondisi tempat yang spesifik.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa menggunakan lumpur aktif dari limbah domestik yang dicampurkan bakteri lokal untuk menghilangkan logam berat dibandingkan dengan lumpur aktif tanpa bakteri (Bestawy *et al.* 2013). Penanggulangan pencemaran dengan teknik pemanasan dan penyerapan menggunakan arang aktif, zeolit, dan bentonit, ataupun penggunaan limbah pertanian (Endrawanto dan Winarno 1996), pengolahan tanah dan teknik pengairan (Suharsih *et al.* 2000) pencucian atau drainase (Sukmana *et al.* 1986; Undang Kurnia *et al.* 2004). Lahan sawah yang terkena pencemaran limbah pengeboran minyak bumi dapat diatasi atau ditanggulangi dengan pencucian penggunaan bahan organik (Sukmana *et al.* 1986). Prinsip dasar penelitian tersebut adalah bahwa senyawa hidrokarbon yang meracuni tanaman dapat dihilangkan dengan pencucian dan/atau dibuat menjadi tidak aktif oleh bahan organik bila unsur-unsur racun tersebut berasal dari logam berat. Pencucian dilakukan dengan cara memasukkan air irigasi atau air sungai yang tidak tercemar ke lahan sawah yang terkena limbah pada saat pengolahan tanah, kemudian membuang air tersebut melalui parit drainase. Hasil penelitian menunjukkan, bahwa bahan organik tidak berpengaruh terhadap tinggi tanaman, jumlah anakan dan hasil gabah. Namun, pencucian dengan air sungai yang tidak tercemar dapat menghilangkan pengaruh senyawa hidrokarbon dari limbah minyak tersebut.

Bahan-bahan alami seperti pupuk anorganik dan organik, pupuk kandang, dan kapur dapat digunakan dalam memperbaiki kualitas tanah sawah yang mengalami pencemaran. Aktivitas peningkatan mikroba tanah dapat mempengaruhi konsentrasi Cd, Pb, dan Zn dalam tanah (Smejkalova *et al.* 2003). Meskipun tidak sepenuhnya dilakukan secara kimia, Nurjaya (2003) melakukan penelitian di rumah kaca menggunakan zeolit, pupuk kandang, abu sekam, dan karbon untuk menyerap Pb dan Cd dari tanah sawah dari Kabupaten Tegal, Jawa Tengah, yang ditanami bawang merah. Hasilnya menunjukkan, abu sekam mampu menyerap Pb dan Cd lebih banyak dibandingkan dengan amelioran lainnya, baik oleh daun maupun umbi (Tabel 9).

Tabel 9. Serapan Pb dan Cd oleh daun dan umbi bawang merah akibat ameliorasi pada tanah Inceptisol Tegal tercemar pestisida, pada penelitian di rumah kaca

Perlakuan dan takaran	Serapan Pb		Serapan Cd	
	Daun	Umbi	Daun	Umbi
	mg/pot			
Kontrol	0,0093	0,0110	0,0008	0,00077
Zeolit (5 t/ha)	0,0070	0,0102	0,0006	0,00053
Pupuk kandang (5 t/ha)	0,0094	0,0095	0,0006	0,00052
Abu sekam (10 t/ha)	0,0136	0,0134	0,0007	0,00063
Karbon (5 t/ha)	0,0095	0,0104	0,0007	0,00067

Sumber: Nurjaya (2003).

Pencucian Tanah

Mencuci tanah pada dasarnya adalah pengurangan/penanggulangan limbah dengan proses minimalisasi volume. Hal ini dilakukan pada pengerukan (fisik dipindahkan) tanah (*ex situ*) atau on-site (*in situ*). Mencuci tanah seperti yang dibahas dalam kajian ini mengacu pada teknik *ex situ* yang dilaksanakan secara fisik dan atau kimia untuk mengekstrak kontaminan logam dari tanah. Selama pencucian tanah, (1) partikel-partikel tanah yang sebagian besar kontaminasi dipisahkan dari masa fraksi tanah (pemisahan fisik); (2) kontaminan dikeluarkan dari tanah oleh bahan kimia cair dan pulih dari solusi pada substrat padat (ekstraksi kimia); atau (3) kombinasi keduanya (Demont *et al.* 2008). Pencucian tanah *ex situ* sering digunakan terutama dalam remediasi tanah karena (1) benar-benar menghilangkan kontaminan dan karenanya menjamin pembersihan yang cepat dari site yang terkontaminasi; (2) memenuhi kriteria tertentu; (3) mengurangi atau menghilangkan jangka panjang; (4) dapat menjadi solusi yang paling hemat biaya; dan (5) dapat menghasilkan bahan daur ulang atau energi. Kerugian meliputi fakta bahwa kontaminan hanya pindah ke tempat yang berbeda, di mana mereka harus dipantau, resiko penyebaran partikel tanah dan debu yang terkontaminasi selama penghapusan dan transportasi dari tanah yang terkontaminasi, dan biaya yang relatif tinggi. Penggalian bisa menjadi pilihan yang paling mahal ketika sejumlah besar tanah harus dihilangkan, atau dibuang sebagai limbah berbahaya atau beracun.

Teknologi penanggulangan logam berat antara lain adalah dengan elektromediasi. Alat ini bekerja dengan gerakan elektrokinetik, partikel teroksidasi tersuspensi dalam larutan tanah. Melalui penggunaan elektroda, logam dalam larutan tanah dapat dihilangkan. Namun menghilangkan kontaminan logam dari tanah tidak berarti bahwa sebagian besar kontaminan-kontaminan habis. Pencucian tanah terkontaminasi adalah teknologi pengolahan

limbah berdasarkan proses fisik dan/atau kimia. Dengan mencuci tanah secara fisik, seperti perbedaan ukuran butir partikel, kecepatan menetap, berat jenis, energi kimia permukaan, dan sifat magnetik yang dapat memisahkan partikel-partikel. Peralatan yang digunakan adalah peralatan standar pengolahan mineral yang umum digunakan dalam industri pertambangan. Dengan mencuci secara kimia tanah adalah partikel tanah dibersihkan secara selektif mentransfer kontaminan pada tanah ke dalam larutan. Oleh karena logam berat sedikit larut dan terutama terjadi dalam keadaan diserap, mencuci tanah dengan air diharapkan dapat menghilangkan jumlah kation rendah dalam pencucian, bahan kimia harus ditambahkan ke air cucian (Davis and Singh 1995). Hal ini dicapai dengan mencampurkan tanah dengan larutan air asam, alkali, *complexants*, pelarut lain, dan surfaktan. Partikel dibersihkan kemudian dipisahkan dari larutan yang dihasilkan. Solusi ini kemudian diolah untuk menghilangkan kontaminan (misalnya, dengan penyerapan pada karbon aktif atau pertukaran ion).

Oleh karena itu, hanya ekstrak yang mampu melarutkan jumlah besar logam untuk tujuan pembersihan. Dengan demikian bahwa tujuan remediasi tanah adalah untuk menghilangkan logam dan melestarikan sifat tanah alami serta membatasi pilihan ekstrak yang dapat digunakan dalam proses pembersihan.

Jenis ekstrak dibedakan menjadi berbahan kimia dan alami. Berbahan kimia meliputi; surfaktan, cosolvents, siklodekstrin, agen chelating, dan asam organik. Semua ekstrak mencuci tanah ini telah dikembangkan pada beberapa kasus tergantung pada jenis kontaminan pada site tertentu. Sedangkan jenis alami adalah asam organik molekul rendah-berat termasuk oksalat, sitrat, format, asetat, mala, suksinat, malonat, maleat, laktat, aconitic, dan asam fumarat adalah produk alami dari eksudat akar, sekresi mikroba, hasil residu dekomposisi tanaman dan hewan dalam tanah (Naidu and Harter 1998). Dengan demikian penghilang logam oleh asam organik mungkin akan lebih representatif dari pada fraksi logam mobile yang tersedia untuk biota. Penggunaan chelating asam - asam organik sitrat, asam tartarat dan EDTA dalam penghilangan secara simultan Ni, Cu, Zn, Cd, dan Pb dari lempung berpasir terkontaminasi (Wuana *et al.* 2010).

Fitoremediasi

Fitoremediasi disebut juga remediasi hijau, botanoremediasi, agroremediasi, atau perbaikan vegetatif. Dapat juga didefinisikan sebagai strategi *in situ* remediasi yang menggunakan vegetasi dan mikrobiota terkait, perubahan tanah, dan teknik agronomis untuk menghapus kontaminan lingkungan berbahaya. Tanaman dapat memecah atau mendegradasi polutan organik atau menghapus dan menstabilkan kontaminan logam. Metode yang digunakan untuk fitoremediasi kontaminan logam yang sedikit berbeda dari yang digunakan untuk memulihkan lokasi tercemar dengan kontaminan organik. Oleh karena fitoremediasi merupakan

teknologi yang relatif baru, dan masih banyak dalam tahap pengujian, sehingga aplikasinya belum dapat digunakan skala luas. Fitoremediasi adalah hemat energi, metode estetik dari remediasi pada site kontaminasi dengan tingkat rendah sampai sedang. Keuntungan dari fitoremediasi dibandingkan dengan perbaikan klasik adalah bahwa (1) lebih ekonomis menggunakan alat dan perlengkapan yang sama seperti pertanian; (2) tidak mengganggu lingkungan; (3) tempat pembuangan tidak diperlukan; (4) lebih mungkin untuk diterima oleh masyarakat karena lebih estetik. Kerugiannya adalah sebagai berikut (1) tergantung pada kondisi pertumbuhan yang dibutuhkan oleh tanaman (misalnya, iklim, geologi, ketinggian, dan suhu); (2) operasi skala besar memerlukan akses ke peralatan pertanian dan pengetahuan; (3) kesuksesan tergantung pada toleransi tanaman untuk polutan. Teknologi fitoremediasi berpotensi berguna untuk remediasi tanah logam berat terkontaminasi termasuk *phytoextraction* (*phytoaccumulation*), *phytostabilization*, dan *phytofiltration*.

Spesies tanaman *hiperakumulator* yang digunakan pada site logam karena toleransi terhadap kadar polusi relatif tinggi. Beberapa keluarga yang *Brassicaceae*, *Fabaceae*, *Euphorbiaceae*, *Asteraceae*, *Lamiaceae*, dan *Scrophulariaceae*. Tanaman seperti *pennycress alpine* (*Thlaspi caerulescens*), *pomea alpine*, *Haumaniastrum robertii*, *Astragalus racemosus*, *Sebertia acuminata* masing-masing memiliki potensi bioakumulasi sangat tinggi untuk Cd, Zn, Cu, Co, Se, dan Ni (Lassat 2000). Willow (*Salix viminalis* L.), sawi (*Brassica juncea* L.), jagung (*Zea mays* L.), dan bunga matahari (*Helianthus annuus* L.) telah dilaporkan menunjukkan serapan tinggi dan toleransi terhadap logam berat (Schmidt 2003). Menurut Tahar and Keltoum (2011) tanaman anggur dapat dimasukkan sebagai tanaman akumulator Zn, Cu, Cd, dan Fe. *Hyperaccumulators* memiliki beberapa karakteristik yang menguntungkan tetapi mungkin cenderung lambat tumbuh dan menghasilkan biomassa rendah, dan tahun atau dekade yang diperlukan untuk membersihkan lokasi yang terkontaminasi. Untuk mengatasi kekurangan ini, ditingkatkan kimia *phytoextraction* telah dikembangkan. Pendekatan ini memanfaatkan tanaman biomassa tinggi yang diinduksi untuk mengambil sejumlah besar logam ketika mobilitas mereka di tanah ditingkatkan dengan perlakuan kimia dengan chelating asam organik.

Phytofiltration adalah penggunaan akar tanaman (*rhizofiltration*) atau bibit (*blastofiltration*). Konsepnya tanaman digunakan untuk menyerap polutan terutama logam dari air tanah dan air limbah tercemar (Garbisu and Aikorta 2001). Rizosfir adalah daerah tanah yang mengelilingi permukaan akar tanaman, biasanya sekitar permukaan akar. Kontaminan yang baik teradsorpsi ke permukaan akar atau diserap oleh akar tanaman. Tanaman yang digunakan untuk *rhizofiltration* tidak ditanam langsung *in situ* tetapi ditanam untuk polutan yang pertama. Tanaman hidroponik tumbuh di air bersih daripada, sampai sistem akar yang besar telah dikembangkan. Setelah sistem akar yang besar di tempat, pasokan air diganti untuk pasokan air tercemar untuk menyesuaikan diri

tanaman. Setelah tanaman menjadi diaklimatisasi, tanaman ditanam di daerah tercemar, di mana akar menyerap air tercemar. Akar tanaman menjadi jenuh dan dipanen dan langsung dibuang secara aman. Hal ini dilakukan berulang, agar dapat mengurangi polusi ke tingkat yang sesuai seperti yang dicontohkan di Chernobyl di mana bunga matahari ditanam di kolam yang tercemar radioaktif (Scragg 2006). Penelitian Undang Kurnia *et al.* (2004b) pada lahan sawah yang tercemar limbah industri tekstil di Kecamatan Rancaekek, Kabupaten Bandung, membuktikan bahwa mendong dan eceng gondok yang ditanam pada tanah sawah mampu menyerap logam berat (Tabel 10). Namun, kandungan beberapa unsur logam berat seperti Ni, Cr, Mn, dan Zn dalam tanah sawah mengalami peningkatan setelah 100 hari sejak penanaman. Hal tersebut diduga karena di dalam tanah sawah sering mengalami perubahan kondisi reduksi dan oksidasi, terutama pada saat pengolahan tanah, dan satu atau dua minggu menjelang panen, menyebabkan logam tersebut lebih banyak terbentuk di dalam tanah. Selain itu secara alami, unsur-unsur Mn, Zn, dan Fe yang ada di dalam tanah sawah sering dijumpai dalam konsentrasi tinggi tergantung bahan induk dan kondisi tanah. Dalam konsentrasi yang berlebihan dan dalam bentuk senyawa atau ion tertentu (tergantung kondisi tanah), logam berat tersebut dapat berpengaruh buruk terhadap pertumbuhan tanaman padi. Hasil penelitian tersebut juga membuktikan, bahwa logam berat terkonsentrasi lebih banyak pada akar dibandingkan dengan bagian batang atau daun tanaman, walaupun perbedaan tersebut tidak nyata (Tabel 10).

Tabel 10. Konsentrasi logam berat dalam tanah, akar, batang pada beberapa jenis tanaman (Undang Kurnia *et al.*, 2004b)

Perlakuan	Pb	Cd	Co	Ni	Cr	Fe	Mn	Cu	Zn
	ppm								
Tanah awal	15,04	0,13	19,90	16,10	19,30	53,455	522	58	11
Mendong									
• tanah	12,71	0,11	14,13	18,15	26,09	49,883	931	50	246
• akar	7,79	0,49	12,97	10,76	14,85	47,780	1,094	46	211
• batang	1,10	0,09	1,58	1,53	2,07	2,365	1,046	13	108
Eceng gondok									
• tanah	11,52	0,11	14,50	17,28	23,95	50,486	849	49	317
• akar	4,62	0,32	8,77	7,32	12,68	31,084	616	31	159
• batang	2,30	0,06	4,17	3,87	5,40	3,727	580	16	108
Kontrol/rampak									
• tanah	13,74	0,11	14,47	19,38	26,41	53,387	817	53	478
• akar	2,21	0,41	6,22	3,84	4,96	20,251	512	14	61
• batang	0,60	0,01	0,63	1,57	1,67	1,996	1,210	8	39

Penutup

Lahan pertanian di dunia sekitar 20 juta hektar diirrigasi dengan air limbah, baik dari industri atau rumah tangga. Selain itu studi di Asia dan Afrika, bahwa pertanian berbasis irigasi, air limbah menyumbang 50 persen dari pasokan sayuran ke daerah perkotaan. Dari pernyataan tersebut, ternyata lahan pertanian saat ini sudah terkontaminasi atau tercemar dengan logam berat. Dalam upaya mengendalikan pencemaran logam berat pada lahan pertanian terlebih dahulu ada upaya pengendalian sumber dan penyebab pencemaran yang dihasilkan dari industri, baik industri pertanian maupun non pertanian, kegiatan pertambangan baik legal maupun ilegal serta rumah tangga. Upaya pengendalian sumber dan penyebab pencemaran dapat dilakukan dengan penataan kembali keberadaan sumber pencemar melalui penegakan hukum, peraturan dan perundang-undangan serta pengawasan yang ketat tentang kewajiban pelaku industri mengoptimalkan fungsi instalasi pengolahan air limbah (IPAL), dan optimalisasi fungsi pengawasan dan pengendalian oleh Badan Pengendali Dampak Lingkungan (Bappedal). Hal yang lebih penting adalah sanksi yang diberikan pada pelaku pencemaran logam berat perlu di kaji ulang.

Dampak pencemaran logam berat pada lahan pertanian difokuskan pada upaya penanggulangan objek yang terkena dampak, antar lain tanah dan tanaman termasuk hasil, serta sumber air. Tujuannya adalah untuk mengendalikan pencemaran logam berat, agar kualitas lahan menjadi baik, termasuk kualitas secara fisik, kimia dan biologi. Disamping itu dengan teknologi pengendalian pencemaran logam berat lahan pertanian dapat memberikan sumbangan kesehatan bagi manusia dan hewan. Di Indonesia pengendalian pencemaran logam berat masih terlalu mahal untuk mengaplikasikan teknologi negara lain. Dampaknya adalah badan air atau sungai menjadi satu-satunya solusi untuk membuang limbah. Hal ini salah satu penyebab tercemarnya lahan pertanian dengan logam berat melalui penggunaan air irigasi.

Pengendalian pencemaran secara fisik atau kimia, yaitu dengan cara salah satunya adalah mencuci tanah yang terkontaminasi logam berat, masih kurang populer dikalangan industri, begitu juga dengan teknologi bioremediasi/fitoremediasi. Padahal Indonesia banyak tanaman tropis yang dapat dijadikan sebagai akumulator logam berat. Sebagai sumber plasma-nutfah terbesar di dunia seharusnya Indonesia mampu mengatasi atau mengendalikan lahan pertanian yang terkontaminasi logam berat. Dasar hukum pelaksanaan pengendalian tentang lingkungan hidup sudah ada (UU, RI no 32 th 2009). Namun batas kritis tanah akibat kontaminasi logam berat masih belum diketahui, sehingga kalau terjadi kasus pada suatu wilayah, maka pendekatan dilakukan pada batas kritis logam berat pada suatu negara. Dengan demikian penelitian mengenai pencemaran logam berat terhadap tanah di Indonesia masih

perlu dikembangkan, terutama melalui fitoremediasi. Hal ini untuk mewujudkan lahan pertanian yang sehat bebas pencemaran dari logam berat.

Daftar Pustaka

- Andarani, P. dan D. Roosmini. 2010. Profil Pencemaran Logam Berat (Cu, Cr dan Zn) pada Air Permukaan dan Sedimen di Sekitar Industri Tekstil PT X (Sungai Cikijing). diakses 28 Maret 2014.
- Anonim. 1977. The Condensed Chemical Dictionary. Van Nostrand Reinhold Company. New York.
- Anoduadi, C.O., L. B. Okenwa, F. E. Okieimen, A. T. Tyowua, and E.G. Uwumarongie-Ilori 2009. "Metal immobilization in CCA contaminated soil using laterite and termite mound soil. Evaluation by chemical fractionation" *Nigerian Journal of Applied Science* 27: 77-87.
- Alloway, B. J. 1995. Heavy Metals in Soils. Blackie Academic and Professional, London, UK, 2nd edition.
- Appenroth Klaus-J. 2014. Chapter 2, Definition of "Heavy Metals" and Their Role in Biological Systems. <http://www.springer.com/978-3-642-02435-1> diakses 28 Maret 2014
- Artanti, R., Mulyadi, dan E.S. Harsanti. 2010. Identifikasi pencemaran logam berat Cr pada badan air dan lahan sawah di DAS Juwana. Buku I dalam prosiding Seminar dan Lokakarya Nasional inovasi Sumberdaya Lahan. Kebijakan dan Informasi Sumberdaya lahan dan Lingkungan. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian. Kementerian Pertanian.
- Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. 1992. 5 Tahun Penelitian dan Pengembangan Pertanian (1987-1991). Sumbangan dan Menyongsong Era Tenggul landas. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Departemen Pertanian RI. Jakarta.
- Basta, N. T., J. A. Ryan, and R. L. Chaney. 2005 Trace element chemistry in residual-treated soil: key concepts and metal bioavailability. *Journal of Environmental Quality* 34(1): 49-63.
- Bestawy E. El., Shacker Helmy, Hany Hussien, Mohamed Fahmy, and Ranya Amer. 2013. Bioremediation of heavy metal-contaminated effluent using optimized activated sludge bacteria. *Appl Water Sci* (2013) 3:181-192
- Boisson, J., M. Mench, J. Vangronsveld, A. Ruttens, P. Kopponen, and T. De Kie 1999. "Immobilization of trace metals and arsenic by different soil additives: evaluation by means of chemical extractions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 30(3-4): 365-387.

- Bjuhr J., 2007. Trace Metals in Soils Irrigated with Waste Water in a Periurban Area Downstream Hanoi City, Vietnam. Seminar Paper, Institutionen för markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Uppsala, Sweden. (Unpublished).
- BPS 2013. Statistik Indonesia 2013, Badan Pusat Statistik. www.bps.go.id. Diakses 3 Maret 2014.
- Chlopercka, A., J.R. Bacon., M.J. Wilson, and J. Key 1996. Forms and cadmium, lead, and zinc in contaminated soil from southwest Poland. *J. Environ. Qual.* 25:69-79.
- Davies, B. E. 1990. Lead. p. 177-196. *In* Heavy Metal in Soils. Blackie Glasgow and London Halsted Press John Wiley and Sons Inc. New York.
- Davis, A.P. and I. Singh. 1995. Washing of zinc(II) from contaminated soil column. *Journal of Environmental Engineering* 121(2): 174-185.
- Dermont, G.M., Bergeron, G. Mercier, and M. Richer-Lafleche. 2008. Soil washing for metal removal: a review of physical/chemical technologies and field applications. *Journal of Hazardous Materials* 152(1): 1-31.
- Direktorat Jenderal Pengawasan Obat dan Makanan. 1989. Lampiran Surat Keputusan Direktur Jenderal Pengawasan Obat dan Makanan No. 03725/B/SK/VII/89 tentang Batas Maksimum Cemaran Logam Berat dalam Makanan.
- Doelman, P. 1986. Resistance of soil microbial communities to heavy metals. p.369-398 *In* FEMS Symposium No. 33. Microbial Communities in Soil. Copenhagen, August 4-8, 1985. Elsevier Applied Science Publisher Ltd. London, U.K.
- Duffus, J.H. 2002. Heavy metals a meaningless term? (IUPAC Technical Report) *Pure Appl. Chem.* 74(5): 793-807 (2002).
- Eary, L.E. 1999. Geochemical and equilibrium trend in mine pit lake. *J. Geochem. Expl.* 64. 223-236.
- Endrawanto dan H. Winarno. 1996. Proses pengolahan limbah secara fisika dan kimia. Prosiding Pelatihan dan Lokakarya Peranan Bioremediasi dalam Pengelolaan Lingkungan. LIPI-BPPT-HSF.
- Franko CR and Dzombak DA. 1997. Remediation of Metals- Contaminated Soils and Groundwater. Technology Evaluation Report TE-97-01. UESPA Ground-Water Remediation Technology Analysis Center, Pittsburgh.
- Gannon, K 2011. Pollution fact/ type of pollution. LiveScience Contributor. <http://www.livescienc.com>. diakses 25 Maret 2014.

- Garbisu, C and I. Alkorta 2001. Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource Technology* 77(3): 229-236.
- Gupta, S. K. T. Herren, K. Wenger, R. Krebs, and T. Hari 2000. In situ gentle remediation measures for heavy metal-polluted soils. p. 303-322 in N. Terry and G. Bañuelos (Eds.). *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. Lewis Publishers, Boca Raton, Fla, USA.
- Hashimoto, Y., H. Matsufuru, M. Takaoka, H. Tanida, and T. Sato 2009. Impacts of chemical amendment and plant growth on lead speciation and enzyme activities in a shooting range soil: an X-ray absorption fine structure investigation. *Journal of Environmental Quality*. 38(4): 1420-1428.
- Heny C. dan E. Susanti. 2009. Karakteristik limnologis kolong bekas tambang timah di Pulau Bangka. *Limnotek*. XVI (2): 119-131.
- Hu, Y., Xueping Liu, Jinmei Bai, Kaimin Shih, Eddy Y. Zeng, and Hefa Cheng. 2013. Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization. *Environ Sci Pollut Res*. 20:6150-6159.
- Jones, L. H. P. and S. C. Jarvis. 1981. The fate of heavy metals. D. J. Green and M. H. B. Hayes (Eds.). *In The Chemistry of Soil Processes*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA. p.593.
- Keller, C., S. P. McGrath, and S. J. Dunham. 2002. Trace metal leaching through a soil-grassland system after sewage sludge application. *Journal of Environmental Quality* 31(5): 1550-1560.
- Kementrian ESDM. 2006. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No 045 Tahun 2006. Tentang Pengelolaan Lumpur Bor, Limbah Lumpur dan Serbuk Bor Pada Kegiatan Pengeboran Minyak dan Gas Bumi. pukum.esdm.go.id. Diakses 15 April 2014.
- Kumiawan. 2013. Pengaruh Kegiatan Penambangan Timah terhadap Kualitas Air Laut dan Kualitas Ikan Kakap Merah (*Lutjanus campechanus*) hasil tangkapan di wilayah pesisir Kabupaten Bangka Provinsi Kepulauan Bangka Belitung. Tesis. Magister Manajemen Sumberdaya Pesisir dan Pantai Universitas Diponegoro.
- Lahuddin, M. 2007. Aspek unsure mikro dalam kesuburan tanah. USA Press Medan.
- Larson, W.E, and F.J. Pierce. 1994. The dynamic of soil quality as a measure of sustainable. Management. P. 37-51. In J.W. Doran., D.C. Coleman, P. F. Bezdicek., and B.A. Stewar (Eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA. Special Publication no.35. Madison, Wisconsin, USA.

- Lasat, M.M. 2000. Phytoextraction of metals from contaminated soil: a review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues. *Journal of Hazardous Substances Research* 2: 1-25.
- Lei, B.D., B.J. Carter., N.T., and B. Weaver. 1997. Factors influencing heavy metal distribution in six Oklahoma benchmark. *Soils Sci. Am. J.* 61: 218-223.
- Lestari dan Edward. 2004. Dampak pencemaran logam berat terhadap kualitas air laut dan sumberdaya perikanan (studi kasus kematian massal ikan-ikan di Teluk Jakarta). *Makara sains* 8(2): 52-58.
- Lombi, E., F. J. Zhao, and G. Zhang. 2002. In situ fixation of metals in soils using bauxite residue: chemical assessment. *Environmental Pollution* 118(3): 435-443.
- Martin, T.A. and M. V. Ruby 2004. Review of in situ remediation technologies for lead, zinc and cadmium in soil. *Remediation* 14(3): 35-53.
- McLaren, R. G., L. M. Clucas, M. D. Taylor, and T. Hendry 2004. Leaching of macronutrients and metals from undisturbed soils treated with metal-spiked sewage sludge. 2. Leaching of metals. *Australian Journal of Soil Research* 42(4): 459-471.
- McLaren, R. G., L. M. Clucas, and M. D. Taylor 2005 Leaching of macronutrients and metals from undisturbed soils treated with metal-spiked sewage sludge. 3. Distribution of residual metals. *Australian Journal of Soil Research* 43(2): 159-170.
- McLaughlin, M. J., R. E. Hamon, R. G. McLaren, T. W. Speir, and S. L. Rogers 2000. Review: a bioavailability-based rationale for controlling metal and metalloid contamination of agricultural land in Australia and New Zealand. *Australian Journal of Soil Research* 38(6): 1037-1086.
- Meising, F.B.J., and G.J. Skladany. 1993. Bioremediation of contaminated soil. In F.B. Meising (Ed.). *Soil Microbial Ecology: Applications in Agricultural and Environmental Management*, Marcel Dekker, Inc. New York.
- Ministry of State for Population and Environment Republic of Indonesia and Dalhousie University Canada. 1992. *Environmental Management in Indonesia. Report on Soil Quality Standards for Indonesia (interim report)* (Tidak dipublikasikan).
- Shah, C.N., R.N. Yong, and B.F. Gibbs. 2001. Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: a review, *Engineering Geology* 60 (2001) 371-380.
- Siswanto, A. Pramono, dan A. Ansori. 2008. Pencemaran merkuri pada tanah dan air bawah akibat penambangan emas di Gunung Pongkor Bogor. *Buku 1*

- dalam Prosiding Seminar Nasional Sumberdaya Lahan dan Lingkungan Pertanian. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian, Badan Litbang Pertanian, Departemen Pertanian.
- Mulyadi, R. Artant, dan D. Nursyamsi. 2010. Identifikasi pencemaran logam berat Pb pada lahan sawah di DAS Solo Hilir Kabupaten Bojonegoro. Prosiding Seminar dan Lokakarya Nasional inovasi Sumberdaya Lahan. Buku I. Kebijakan dan Informasi Sumberdaya lahan dan Lingkungan. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian. Kementerian Pertanian.
- Nagajyoti PC, LeekD, and Sreekanth T.V.M. 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environ Chem Lett* 8(3):199–216.
- Naidu, R. and R. D. Harter 1998. "Effect of different organik ligands on cadmium sorption by and extractability from soils," *Soil Science Society of America Journal* 62(3): 644–650.
- Nurjaya. 2003. Identifikasi Status dan Sebaran Logam Berat Pb dan Cd di Sentra Bawang Merah Kabupaten Tegal dan Brebes. (Tidak dipublikasikan).
- Pemerintah Republik Indonesia. 1990. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 20 tahun 1990 tentang Pengendalian Pencemaran Air. Lampiran Daftar Kualitas Air Golongan C.
- Pickering, W.F. 1980. Zinc interaction with soil and sediment components. In Nriagu JO. (Ed.): *Zinc in the environment-Part 1: Ecological cycling*. John Wiley & Sons, New York, USA pp 72–112.
- Piotrowski, J.K. and D.O. Coleman. 1980. Environmental hazard of heavy metal: Summary Evaluation of lead, Cadmium, and Mercury. WHO Geneva.
- Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. 2000. Pengkajian Baku Mutu Tanah pada Lahan Pertanian. Laporan Akhir Kerjasama Antara Proyek Pengembangan Penataan Lingkungan Hidup Badan Pengendalian Dampak Lingkungan Jakarta dan Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat-Badan Litbang Pertanian. No. 50/Puslittanak/2000. (Tidak dipublikasikan)
- Raven, P. H., L. R. Berg, and G. B. Johnson 1998. *Environment*, Saunders College Publishing, New York, NY, USA, 2nd edition.
- Schmidt, U. 2003. Enhancing phytoextraction: the effect of chemical soil manipulation on mobility, plant accumulation and leaching of heavy metals. *Journal of Environmental Quality* 32(6): 1939–1954.
- Setyorini, D., Soeparto, dan Sulaeman. 2003. Kadar logam berat dalam pupuk. (dalam Prosiding Seminar Nasional Peningkatan Kualitas Lingkungan dan Produktivitas Pertanian: Pertanian Produktif Ramah Lingkungan Mendukung Ketahanan dan

- Keamanan Pangan. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Jakarta.
- Scragg, A. 2006. *Environmental Biotechnology*, Oxford University Press, Oxford, UK, 2nd edition. 2006.
- Shevenell, L., Connors, K.A., and Henry, C.D. 1999. Control on pit lake water quality at sixteen open pit mines in Nevada. *Appl. Geoch.* 14: 669–687.
- Sherameti, I and Varma. 2010. *Soil Heavy Metal*. XVIII. 429 p.
- Silveira, M. L. A., L. R. F. Aleoni, and L. R. G. Guilherme. 2003. Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agricola* 60(4): 64–111.
- Skladany, G. J., and F. B. Metting. 1993. Bioremediation of contaminated soil, p. 483–513. Metting, F.B. (Ed.). *In Soil Microbial Ecology. Application in Agriculture and Environmental Management*. New York: Marcel Dekker Inc.
- Šmejkalová, M., O. Mikanová, and L. Borůvka. 2003. Effects of heavy metal concentrations on biological activity of soil micro-organisms. *Plant soil Environ.* 49 (7): 321–326.
- Sommarwoto, O. 1991. *Indonesia dalam Kancah Isu Lingkungan Global*. Penerbit PT Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
- Suharsih, P. Setyanto, dan Titi Sopiawati. 2000. Pengaruh penggunaan pupuk N lambat urai terhadap emisi gas N_2O pada lahan sawah tadah hujan. Hal. 67–72 dalam Prosiding Seminar Nasional Budi Daya Tanaman Pangan Berwawasan Lingkungan. Puslitbang Tanaman Pangan, Badan Litbang Pertanian.
- Suhardjo, M. 2010. Identifikasi logam berat dan optimalisasi tanah sawah di sekitar kawasan industri gula madukismo dalam meningkatkan produksi pangan. Prosiding Seminar dan Lokakarya Nasional Inovasi Sumberdaya Lahan. Buku I. Kebijakan dan Informasi Sumberdaya lahan dan Lingkungan. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian. Kementerian Pertanian.
- Sukmana, S., I. Prawirasumantri, M. Sodik, dan M. Rustandi. 1986. Laporan Penelitian Mengatasi Keracunan Limbah Pengeboran Minyak. Pusat Penelitian Tanah-Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian (mimeo).
- Sutrisno, R., dan Mulyadi. 2008. Identifikasi pencemaran lahan sawah akibat limbah pabrik kertas. Buku I dalam Prosiding Seminar Nasional Sumber Daya Lahan dan Lingkungan Pertanian. Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian. Departemen Pertanian.

- Tahar, K and B. Keltoum. 2011. Effects of Heavy Metals Pollution in Soil and Plant in the Industrial Area, West Algeria. *Journal of the Korean Chemical Society* 55(6).
- Undang Kurnia, H. Suganda, R. Saraswati, dan Nurjaya. 2004. Teknologi pengendalian pencemaran lahan sawah. Hal. 251-285 Tanah Sawah dan Teknologi Pengelolaannya. Puslitbang Tanah dan Agroklimat. Badan Litbang. Departemen Pertanian.
- Undang Kurnia, Deddy Erlandi, dan H. Kusnadi. 2004b. Rehabilitasi dan Reklamasi Tanah Sawah Tercemar Limbah Industri Tekstil di Kabupaten Bandung. Makalah disampaikan dalam Ekspose Hasil-hasil Penelitian di Kantor Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Bandung. Soreang, 24 Maret 2004. (Tidak dipublikasikan)
- USDA. 2003. Soil quality information sheet. Pastureland Sheet 1. USDA Natural Resources Conservation Service. www.nrcs.usda.gov. Diakses 21 Maret 2014.
- US. EPA. 1993. Clean Water Act, sec. 503. (U.S. Environmental Protection Agency Washington, D.C.). 58(32)
- US.EPA. 1994. A plain english guide to the EPA part 503 biosolids rule. USEPA Rep. 832/R-93/003, USEPA, Washington, DC, USA.
- US.EPA. 1997. Recent developments for in situ treatment of metal contaminated soils. Tech. Rep. EPA-542-R-97-004, USEPA, Washington, DC, USA.
- Wahab, A. S. and F. A. Marikar. 2012. The environmental impact of gold mines pollution by heavy metals. *Central European Journal of Engineering* 2(2): 304-313.
- Wahyuni, H., S. B. Sasongko dan D. P. Sasongko. 2013. Kandungan logam berat pada air, sedimen dan plankton di daerah penambangan masyarakat Desa Batu Beluhang Kabupaten Bangka Tengah. Hal. 489-494 dalam Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan.
- Wuana, R. A. and Felix, E. Okielmen. 2011. Heavy Metals in Contaminated Soil: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecology*. Article ID 402647. 20 p.
- Wuana, R. A., F. E. Okielmen, and J. A. Imborvungu. 2010. Removal of heavy metals from a contaminated soil using organic chelating acids. *International Journal of Environmental Science and Technology* 7(3): 485-496.

8. REKLAMASI LAHAN PASCA PENAMBANGAN BATUBARA

Sidik Haddy Tala'ohu¹⁾ dan Irawan²⁾

Peneliti BalitBangtan di ¹⁾ Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi; ²⁾ Balai Penelitian Tanah

Pendahuluan

Batubara adalah endapan senyawa organik karbon yang terbentuk secara alamiah dari sisa tumbuh-tumbuhan. Batubara merupakan salah satu sumber energi yang cukup penting untuk menunjang kehidupan manusia. Di Indonesia, batubara merupakan sumber energi ketiga setelah minyak, gas bumi, dan beberapa pembangkit listrik sudah menggunakan batubara sebagai sumber energinya.

Areal penambangan batubara di Indonesia terdapat di Sumatera Barat, Sumatera Selatan, Kalimantan Timur, Kalimantan Selatan, dan Jawa Barat dengan perkiraan deposit sebesar 750 sampai 1.050 juta metrik ton (Umar 1986 dalam Puslittanak 1995). Deposit batubara pada umumnya terdapat di bawah tanah Ultisols, Inceptisols, atau Oxisols. Tingkat kesuburan tanah tersebut dengan vegetasi hutan atau belukar tergolong memadai atau sedang karena terjadinya keseimbangan ekosistem, tetapi kesuburan alami tersebut sebenarnya bersifat semu dan ringkih atau tidak kokoh/mudah terdegradasi. Ultisols dengan vegetasi hutan mempunyai lapisan tanah atas (*top soil*) dengan kesuburan yang relatif baik. Penebangan hutan untuk tujuan penambangan batubara akan menyebabkan laju erosi dan degradasi lahan terus meningkat, kandungan bahan organik dan kesuburan tanahnya cepat menurun, ketersediaan hara tanaman rendah, bahkan terdapat unsur aluminium dan besi yang dapat meracuni tanaman.

Lahan pasca penambangan batubara umumnya gersang, vegetasi sulit tumbuh, dan menjadi tidak produktif. Pada saat terjadi hujan, air sulit meresap ke dalam tanah atau sebagian besar mengalir di permukaan, akibatnya air tanah berkurang dan erosi terus meningkat bahkan ancaman banjir dan longsor terus mengintai. Sangat disayangkan apabila lahan pasca penambangan batubara akhirnya menjadi tidak produktif dan justru mendatangkan bencana bagi manusia. Oleh sebab itu, lahan pasca penambangan tidak boleh ditinggalkan begitu saja dan perlu usaha serius untuk mengembalikan kondisi lahan tersebut seperti sediakala atau paling tidak mendekati keadaan semula sebelum penambangan. Upaya pemulihan untuk mengembalikan kondisi lahan pasca penambangan disebut reklamasi.

Manakala dapat dikelola dengan baik, maka lahan timbunan pasca penambangan batubara merupakan salah satu sumber daya lahan yang berpotensi besar untuk mendukung pembangunan pertanian, baik untuk

perkebunan, tanaman pangan, hortikultura, dll. Dengan demikian di masa mendatang, pemanfaatan lahan timbunan untuk ekstensifikasi atau perluasan areal pertanian berpeluang cukup besar sehingga perlu didorong dan ditingkatkan sebagai upaya adaptasi terhadap perubahan iklim global dan peningkatan produksi pertanian guna mendukung program ketahanan pangan nasional. Kolam-kolam yang berisi air merupakan potensi sumber daya air yang dapat dimanfaatkan untuk mendukung pengembangan pertanian di sekitarnya.

Tujuan penulisan ini adalah sebagai bahan rujukan dalam upaya mereklamasi lahan timbunan pasca penambangan batubara. Diharapkan tulisan ini dapat bermanfaat bagi para pihak yang terkait dengan penambangan batubara agar tidak mencemari lingkungan tetapi dapat dimanfaatkan untuk kepentingan lainnya seperti: objek wisata agro, kolam budi daya ikan air tawar, sumber air irigasi, air pendingin mesin pembangkit tenaga listrik, sarana rekreasi, dan lain sebagainya.

Perubahan Bentang Lahan Pasca Penambangan

Bahan Timbunan

Deposit batubara terbentuk sejak ribuan bahkan jutaan tahun yang lalu, dapat berasal dari hasil angkatan atau lipatan endapan danau seperti yang terdapat di Ombilin Sawah Lunto, Sumatera Barat atau hasil angkatan/lipatan endapan laut terbatas seperti yang terjadi di Sumatera, Kalimantan, dan Jawa.

Pada kegiatan penambangan terbuka (*open pit mining*), untuk mendapatkan deposit batubara diperlukan pekerjaan pembongkaran bukit-bukit dan penggalian sampai berpuluh-puluh meter di bawah permukaan tanah, sehingga terjadi perubahan bentang alam di sekitar areal penambangan. Untuk mencapai lapisan batubara diperlukan pembongkaran dan pemindahan lapisan tanah dan atau bahan non batubara di atasnya ke tempat lain. Batubara secara ekonomis menguntungkan untuk ditambang apabila nisbah batubara dengan bahan non batubara adalah 1 : 5-7. Dampak dari proses penambangan adalah terjadi perubahan ekosistem/vegetasi alami, dan susunan lapisan tanah sehingga dalam penataannya perlu dilakukan sedemikian rupa sehingga tidak menimbulkan kerusakan lingkungan yang lebih besar.

Eksplorasi batubara dilakukan dengan cara membongkar beberapa lapisan tanah sehingga, kawasan yang semula berupa hutan, berubah menjadi lahan terbuka pasca penambangan. Suksesi kawasan hutan tidak berjalan dengan baik sehingga berbagai jenis flora dan fauna turut kehilangan habitatnya. Berdasarkan peraturan perundangan, penambangan batubara tergolong pada rencana kegiatan yang akan menimbulkan dampak penting terhadap lingkungan hidup dan oleh karena itu, perlu dilakukan secara hati-hati, cermat dengan terlebih dahulu dikaji aspek dampak lingkungannya (SNRI 2009).

Bahan sisa galian penambangan batubara terdiri atas sisa batubara atau batubara muda dan batuan seperti batu liat (*clay stone*), batu lanau (*silt stone*), batu pasir (*sand stone*), atau tufa vulkan (Dai 1993; Soekardi *et al.* 1995). Umumnya areal timbunan tersebut dalam beberapa tahun pertama sulit ditumbuhi vegetasi karena berbagai macam kendala, seperti tingginya tingkat kemasaman tanah dan miskin unsur hara. Pada saat hujan, air tidak bisa atau lambat masuk ke dalam tanah karena laju infiltrasinya tergolong sangat lambat. Pada kondisi demikian, bahaya erosi meningkat, demikian pula dengan ancaman banjir, dan longsor. Upaya yang perlu dilakukan untuk memperbaiki kondisi areal timbunan antara lain melapisinya dengan lapisan tanah yang lebih baik (*top soil/sub soil*), dari jenis tanah (*Ultisols, Oxisols, Inceptisols*). Upaya tersebut berpengaruh baik terhadap pertumbuhan beberapa jenis tanaman seperti: anggasa, akasia, lamtoro, dan arborea. Lapisan tanah *top soil/sub soil* yang digunakan sebenarnya juga bermasalah karena tingkat kesuburannya rendah dan mengandung unsur yang dapat meracuni tanaman seperti aluminium. Hasil penelitian Mulyani *et al.* (1995) di rumah kaca Sindang Barang memperlihatkan bahwa pertumbuhan tanaman jagung lebih baik pada campuran tanah merah dan *blue clay* (endapan liat) dengan perbandingan 4 : 1.

Perubahan Bentang Lahan

Pada akhir penambangan, terdapat dua bagian pasca penambangan yang harus direklamasi yakni: (1) lahan timbunan berupa bukit-bukit kecil dengan kemiringan tertentu; dan (2) kolam-kolam yang cukup dalam (20 sampai lebih dari 100 m di bawah permukaan tanah) seperti disajikan pada Gambar 1.



(a)



(b)



(c)



(d)



(c)



(f)

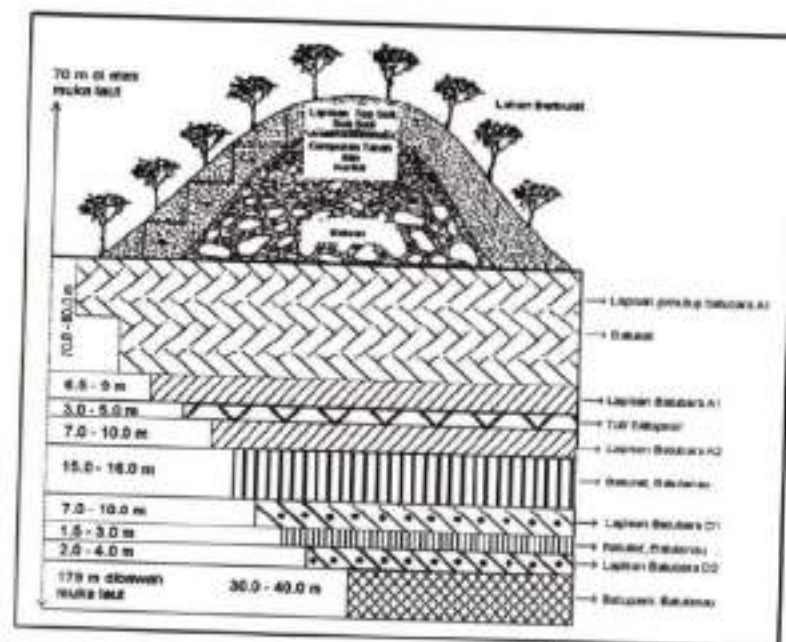
Gambar 1. Kondisi lahan pada areal penambangan, timbunan, dan kolam pasca penambangan (di Tanjung Enim, Sumatera Selatan (a, b, c), dan di Kalimantan Selatan (d, e, f) (Foto: G. Syamsidi, S. H. Tala'ohu, dan D. Erfandi)

Areal timbunan sebagai tempat penimbunan bahan non batubara dan bahan-bahan lainnya, pelapisannya tidak teratur karena berasal dari bahan yang ditimbun secara acak dan menggunakan alat berat seperti: *excavator*, *boulder*, dan atau *dump truck*. Bahan timbunan tersebut pada posisi asalnya tidak membahayakan lingkungan, karena terletak jauh di bawah permukaan tanah dan berada dalam keadaan kesetimbangan. Begitu bahan-bahan tersebut dibongkar/diangkut ke luar dan teroksidasi sehingga membentuk kondisi kesetimbangan baru. Misalnya tersingkapnya lapisan pirit, munculnya garam-garam yang dapat meracuni tanaman, dan bahan pencemar lingkungan, akibatnya tanaman tidak mampu tumbuh pada kondisi yang ekstrim tersebut.

Penggalian dan Penataan Timbunan

Beberapa hal yang perlu diperhatikan pada pekerjaan penggalian adalah:

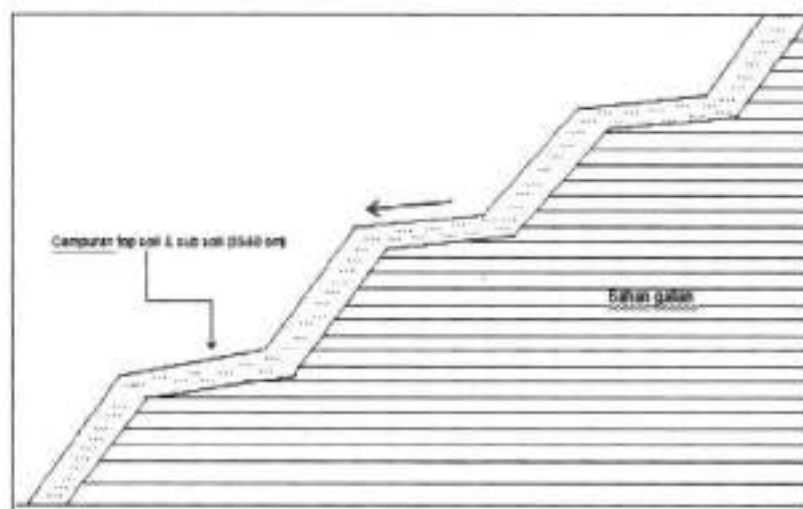
1. Pada waktu pembongkaran bukit-bukit (Gambar 2), lapisan tanah atas terlebih dahulu diamankan/dipisahkan untuk digunakan sebagai bahan timbunan paling atas, kecuali batu dan kerikil yang harus dipisahkan untuk pengeras jalan. Bahan tuf dapat dipakai sebagai lapisan penimbunan di bagian bawah.
2. Apabila penggalian sudah sampai pada lapisan endapan marin yang berwarna kelabu, bahan non batubara tersebut perlu dipisahkan atau jangan dicampur dengan tanah merah, dan ditimbun sebagai lapisan bawah.



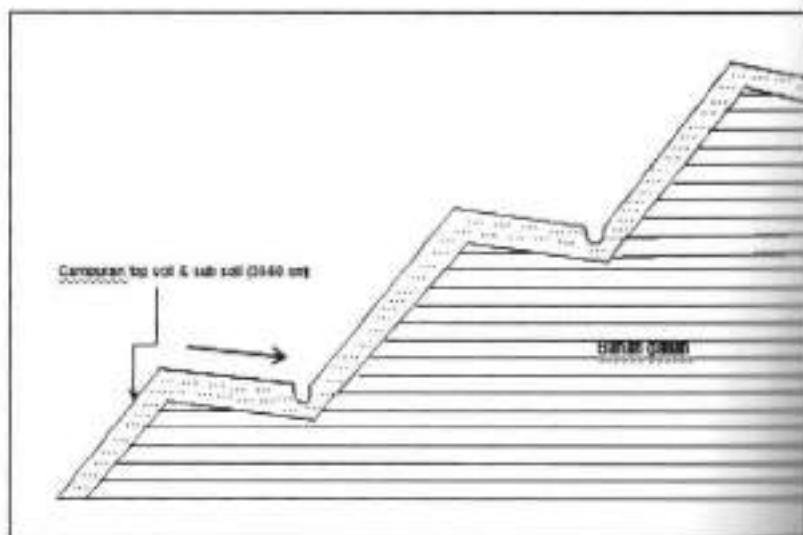
Gambar 2. Penampang galian dari puncak bukit sampai lapisan di bawah deposit batubara (Sumber: modifikasi dari Umar 1985 dalam Puslittanak 1995)

Sedangkan hal-hal yang perlu mendapat perhatian pada saat penimbunan antara lain:

1. Bahan galian yang berasal dari endapan paling bawah, ditempatkan pada lapisan paling bawah, disusul lapisan-lapisan berikutnya.
2. Lapisan tanah atas (*top soil*, *sub soil*) hasil pembongkaran bukit-bukit, dijadikan sebagai lapisan paling atas.
3. Apabila penimbunan dilakukan berteras-teras, maka bidang datarnya hendaknya dibuat miring ke arah dalam, dengan kemiringan $\pm 2\%$. Cara ini berlaku baik untuk timbunan yang dilapisi tanah merah maupun yang tidak dilapisi tanah merah (Gambar 3a dan Gambar 3b) sebagai upaya untuk mengendalikan aliran permukaan, erosi, dan longsor.



Gambar 3a. Sketsa cara penimbunan dengan bidang olah yang miring ke luar (ke arah lereng makro) menyebabkan erosi cukup besar di bidang olah dan tampingan teras (Sumber: modifikasi dari Umar 1986 dalam Puslittanak 1995)



Gambar 3b. Sketsa cara penimbunan dengan bidang olah miring berlawanan arah dengan lereng awal sehingga erosi relatif kecil (Sumber: modifikasi dari Umar 1986 dalam Puslittanak 1995)

Reklamasi Lahan Pasca Penambangan Batubara

Karakteristik Bahan Timbunan

Bahan timbunan berasal dari bahan lapisan tanah berupa fragmen/bongkahan yang sangat masif dan keras yang terdiri atas batu liat, batu lanau, batu pasir, dan serpihan batubara muda. Dai dan Suseno (1993) mengatakan bahwa lapisan *blue clay* (BCI) mengandung mineral 2:1 (*smektit* dan *Al-interlayered*) yang mengandung garam-garam Sulfat seperti Jerosit ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_4$), Epsomit ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$), Hanksit ($Na_2KCl(CO_3)_2(SO_4)_2$), Pirit (FeS_2), dan Karbonat. Garam-garam tersebut berperan dalam meningkatkan kemasaman tanah dan degradasi mineral 2:1. Selanjutnya Widjaja Adhi (1993) menambahkan bahwa bahan-bahan *blue clay* pada awalnya bereaksi alkalis (pH 7,0 - 8,0), tetapi setelah teroksidasi, maka pirit akan membentuk garam dan asam sulfat yang secara drastis menurunkan pH tanah areal timbunan.

Kendala tanah seperti: pH sangat masam, tingginya kadar garam, rendahnya tingkat kesuburan, tanah terlalu padat, struktur tanah yang tidak stabil, permeabilitas yang lambat, dan aerasi tanah yang jelek merupakan pembatas utama yang dihadapi dalam mereklamasi areal timbunan pasca penambangan batubara (Widjaja 1993; Puslittanak 1993 dan 1995; Sidik *et al.* 1995; 1996; 1998a dan 1998b; Retno *et al.* 1995; Mulyani *et al.* 1998).

Lahan timbunan pada tahun awal hanya mampu ditumbuhi tanaman pionir seperti rumput kawat (*California grass*), dan semak berduri. Lahan timbunan secara umum terdiri atas dua lapisan, yaitu (1) lapisan bawah dengan ketebalan beberapa meter hingga puluhan meter. Bahan yang ditimbun berupa fragmen/bongkahan, batu liat, endapan liat (*blue clay*), batu pasir, batubara muda, dan sisa batubara yang tidak terpilih. Sifat fragmen batuan adalah sangat masif, sangat keras, dan dipadatkan secara mekanis. Dalam keadaan terbuka, fragmen batuan mudah hancur terkena air hujan, mudah rekah, dan melimpur; (2) komponen lapisan atas yang umumnya ditutupi dengan tanah atas mempunyai ketebalan 50-75 cm. Tanah atas ini merupakan bahan campuran tanah, baik dari *top soil*, *sub soil*, dan bahan induk yang sudah melapuk. Dengan alasan praktis dan untuk menekan biaya, tanah atas ini penyebaran dan perataannya dilakukan secara mekanis. Tanah atas diyakini mempunyai sifat fisika, kimia, dan biologi lebih baik dibandingkan bahan timbunan di bawahnya. Lapisan tanah atas ini merupakan media pertumbuhan tanaman reklamasi yang diusahakan.

Pada lahan segmen bawah (bidang alas) yang sudah terbentuk terlebih dulu dengan kelerengan 6 sampai 25 persen, umumnya mengalami erosi parit dengan kedalaman 0,5 - 1,0 meter, dan menjadi tempat dimana air aliran permukaan terkonsentrasi. Kolam pengendapan lumpur yang cepat menjadi dangkal dan adanya keluhan masyarakat sekitar lokasi penambangan akibat

pencemaran sungai merupakan indikasi kuat cukup besarnya erosi dari areal timbunan. Di lain pihak, biaya pemeliharaan, termasuk pengerukan kolam pengendapan lumpur relatif mahal.

Upaya pengendalian erosi, pendangkalan kolam-kolam pengendapan lumpur, dan pencemaran sungai perlu dilakukan sejak dini dengan melakukan penghijauan pada areal timbunan guna menciptakan keadaan lingkungan yang hijau, nyaman, atau tidak gersang. Kegiatan dan upaya penghijauan tersebut bertujuan agar bahaya erosi dan pencemaran sesegera mungkin dikendalikan. Mengingat banyaknya faktor pembatas maka diperlukan berbagai upaya terobosan guna mendapatkan alternatif teknologi reklamasi areal timbunan pasca penambangan agar mampu mengatasi kendala fisika, kimia, dan biologi sehingga lebih cepat dapat ditumbuhi tanaman penutup tanah dan pepohonan.

Top Soil (Tanah Pucuk)

Pengelolaan tanah lapisan atas sangat menentukan keberhasilan reklamasi areal timbunan. Tanah lapisan atas sedapat mungkin diarahkan untuk digunakan sebagai bahan penutup lahan timbunan paling atas dengan ketebalan yang disarankan sekitar 50-75 cm sebagai media tumbuh bagi tanaman reklamasi.

Tanah lapisan atas ini bisa berasal dari *top soil*, *sub soil*, bahkan bahan induk tanah yang telah melapuk dengan sifat fisika, kimia, dan biologi yang jauh lebih baik jika dibandingkan dengan bahan timbunan.

Pada awal penambangan, untuk mendapatkan tanah atas tidak begitu bermasalah, namun menjelang berakhirnya proses penambangan, lapisan tanah atas semakin sulit diperoleh karena luasnya areal timbunan dan sebagian tanah atas tertimbun bahan timbunan. Karena keterbatasan bahan *top soil* (tanah pucuk) untuk dijadikan lapisan atas, sering terdapat beberapa areal timbunan yang tidak dilapisi tanah pucuk. Areal timbunan yang tidak dilapisi tanah pucuk diusahakan lapisan paling atasnya berasal dari bahan timbunan yang tidak bersifat racun bagi tanaman.

Penataan Lahan Timbunan Pasca Penambangan

Penataan lahan timbunan memegang peranan penting dalam upaya reklamasi lahan pasca penambangan. Faktor-faktor yang mempengaruhi bentuk lahan timbunan adalah: (a) volume bahan yang dipindahkan; (b) penambahan volume lahan saat penempatan/penimbunan kembali; (c) terbatasnya ruang atau tempat untuk timbunan; dan (d) bentang lahan sebelum ditambang.

Mengingat umur penambangan relatif pendek maka pemanfaatan lahan pasca penambangan perlu direncanakan secara komprehensif misalnya apakah lahan tersebut akan dihutankan kembali, untuk usaha pertanian, perkotaan, atau obyek wisata, dan lainnya.

Pada umumnya bentuk lahan timbunan terdiri atas punggung yang relatif datar, lebar bidang datarnya 10-15 m, kelerengan bidang miring/tampian 10-20% dengan panjang lereng 5-10 m. Bentuk lahan yang demikian mempunyai bidang dasar yang luas dan semakin ke atas semakin menyempit. Berdasarkan kemajuan kegiatan penimbunan dan bentuk lahan timbunan, kegiatan reklamasi dimulai dari bidang miring diikuti dengan bidang datar pada level paling bawah kemudian ke level berikutnya setelah selesai penimbunan.

Apabila memungkinkan, perbaikan lahan timbunan dapat dilakukan dengan cara memberikan tanah atas yang relatif lebih baik sifat fisika, kimia, dan biologinya. Tanah atas yang digunakan sebetulnya juga mempunyai masalah dalam hal tingkat kesuburannya, bahkan mengandung unsur yang dapat meracuni tanaman. Masalah yang dihadapi pada umumnya berupa unsur hara tanah yang rendah atau tanah miskin, pH rendah, kadar aluminium tinggi dan permeabilitas tanah yang lambat. Rendahnya hara N, P, K, dan bahan organik pada tanah timbunan mensyaratkan pemberian pupuk secara lengkap dan dengan dosis tinggi.

Pada lahan yang terbuka, pukulan air hujan sangat kuat sehingga bahan timbunan mudah mengalami dispersi, dan hanyut bersama aliran permukaan. Bahan timbunan umumnya tidak berstruktur sehingga mudah hancur jika terkena air hujan. Jika hal ini tidak segera ditangani maka sedimen bahan timbunan akan mengalir ke badan-badan air, seperti: sungai, danau, dan kolam.

Lahan pasca penambangan perlu ditata kembali (penataan lahan). Lubang bekas galian apabila memungkinkan perlu ditimbun kembali, namun bila masih terdapat bagian yang tidak dapat ditimbun kembali, dapat dijadikan kolam untuk budidaya ikan, cadangan air atau wahana wisata air, dan lainnya. Tanah yang telah rata ditanami dengan tanaman penutup tanah dari jenis kacang-kacangan (polong-polongan) untuk meningkatkan kesuburan tanah dan mencegah terjadinya erosi (pengendalian erosi). Kacang-kacangan sebagai sumber pupuk hijau karena kemampuannya untuk mengikat dan mengelola mineral dalam tanah seperti nitrogen dan fosfor. Selain itu, penanaman vegetasi penutup tanah akan membuat tanah menjadi lebih gembur. Apabila turun hujan, akan lebih banyak air yang terserap. Erosi akan lebih terkendali dengan membuat saluran air (*drainase*) dan bendungan penahan. Setelah dilakukan kedua tahap reklamasi tersebut, tanah siap untuk ditanami tanaman lain (reklamasi dan penanaman kembali). Agar lahan pasca penambangan dapat kembali seperti semula, perlu dilakukan pemeliharaan tanaman yang digunakan untuk reklamasi (pemeliharaan). Secara berkala dilakukan pemupukan dua tahun sekali, yakni pada awal musim penghujan dan awal musim kemarau. Tanah di sekitar tanaman reklamasi juga perlu dibersihkan menggunakan sistim piringan mengikuti tajuk tanaman, diberi mulsa rumput lokal guna mengendalikan pertumbuhan gulma, dan mengurangi evaporasi, sekaligus sebagai sumber bahan organik.

Prinsip Reklamasi Lahan Pasca Penambangan

Reklamasi yang terencana dan terorganisir dengan baik, diharapkan dapat mengembalikan kondisi lahan pasca penambangan batubara sehingga tidak terkesan tandus, gersang dan tidak mencemari lingkungan di sekitarnya.

Terdapat 5 kegiatan yang perlu ditempuh dalam pengelolaan lahan timbunan, yaitu perencanaan, pelaksanaan, monitoring, evaluasi, dan pelaporan. Upaya reklamasi lahan sudah harus direncanakan secara komprehensif sebelum penambangan dimulai.

Prinsip reklamasi lahan pasca penambangan batubara antara lain:

- 1) Perbaikan kondisi fisika, kimia, dan biologi tanah melalui: (a). perbaikan kondisi aerasi dan tingkat kepadatan tanah dengan cara melakukan pengolahan tanah dalam; (b). pemberian pupuk organik seperti pupuk kandang, kompos, mulsa sisa pangkasan tanaman atau bahan organik lainnya; (c). pemberian pupuk anorganik untuk meningkatkan ketersediaan unsur hara seperti N, P, K, dan (d). pemberian bahan ameliorant seperti kapur (CaCO_3), dolomit, atau abu batubara.
- 2) Mengendalikan aliran permukaan guna mencegah erosi dan longsor dengan cara menanam *legume cover crop* (LCC) yang dapat memfiksasi N dari udara, rumput pakan ternak, dan/atau tanaman penguat teras lainnya; membuat saluran pembuangan air (SPA) yang diperkuat dengan batu atau ditanami rumput (*grass water ways*), mulai dari teras atas sampai ke bawah dan dilengkapi dengan terjunan air dari batu, bambu, kayu; menanam tanaman "barier", seperti Vetiver, Phaspalum, rumput BD pada bibir dan tampungan teras/bidang lereng terutama yang terjal untuk mengendalikan aliran permukaan dan erosi.
- 3) Prioritas pertama menanam tanaman pohon-pohonan pioner untuk penghijauan seperti tanaman angkana, akasia mangium, sengon, lamtoro, gamal, bambu, yang fungsinya terutama untuk meningkatkan bahan organik dan melindungi tanah dari curahan air hujan.
- 4) Menanam pohon-pohonan yang bernilai ekonomi sebagai prioritas kedua seperti mahoni, bambu, sukun, sungkai, jambu mente, yang sifatnya jangka panjang karena bila ditanam dalam jangka pendek kemungkinan mengalami kegagalan karena tingkat kematiannya cukup besar.

Teknik Reklamasi Lahan Timbunan Pasca Penambangan

Penataan penggunaan lahan sangat tergantung pada kondisi dan sifat/kualitas bahan timbunan, bentuk, dan kemiringan lahan, serta iklim, agar usaha tersebut dapat memberikan keserasian dengan daerah di sekitarnya. Aspek utama dalam reklamasi lahan timbunan mencakup tiga hal (Widdowson 1984), yakni (1) rancangan bentuk lahan atau *landscape*; (2) rekayasa media tumbuh tanaman

melalui penanganan selektif bahan tanah atau bahan penutup; dan (3) pengembangan dan pengelolaan vegetasi penutupnya.

Fisik

Lahan timbunan yang di beri lapisan atas tanah merah

Terdapat empat hal yang perlu dilakukan, yaitu (1) stabilisasi bidang miring dengan LCC; (2) stabilisasi bibir teras dengan vetiver atau rumput pakan ternak; (3) pembuatan saluran pembuangan air (SPA); dan (4) stabilisasi bidang datar dengan legum penutup tanah, atau rumput pakan ternak dan pohon-pohonan untuk penghijauan.

Stabilisasi bidang miring dengan LCC

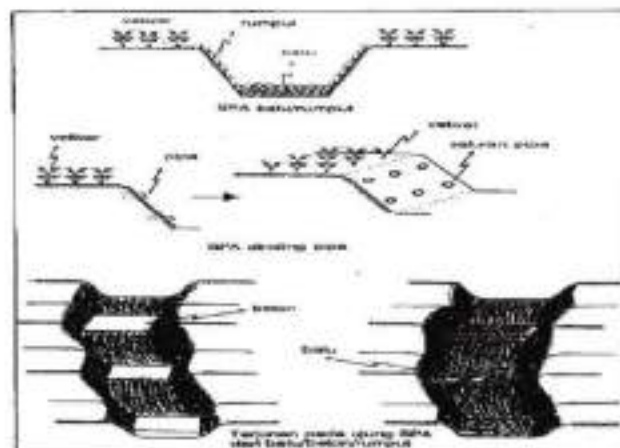
- a. Lahan untuk penanaman LCC diolah terlebih dahulu sampai kedalaman ± 10 cm dengan lebar 30 cm. Kemudian diberi pupuk kandang 5 t/ha, dan P-Alam 0,5 t/ha; bila perlu diberi kapur 2 t/ha. Jarak antar strip 0,5 meter sampai 1 meter. Biji LCC ditanam dalam sistem larikan mengikuti arah kontur.
- b. Setelah LCC menutup permukaan tanah, pada jarak-jarak tertentu dibuat lobang-lobang untuk ditanami vegetasi pohon-pohonan pioner seperti pada bidang datar.

Stabilisasi bibir teras dengan Vetiver atau rumput pakan ternak

Vetiver memiliki sistem perakaran yang dalam dan kuat sehingga mampu menahan erosi serta aliran permukaan. Tanah galian pada bibir teras terlebih dahulu diolah. Vetiver ditanam 2 baris, jarak antara baris 15 cm dan di dalam barisan 15 cm. Tiap lubang ditanami 3 batang/bibit vetiver. Setiap panjang 100 meter diberi pupuk kandang 100 kg, kapur 40 kg, P-Alam 10 kg, sedangkan pupuk urea dan KCl masing-masing diberikan 1 kg. Setelah rumput Vetiver mencapai tinggi ± 80 cm dilakukan pemotongan pada ketinggian $\pm 15-20$ cm dari permukaan tanah. Hijauan rumput Vetiver hasil pemotongan dihamparkan di permukaan tanah yang berfungsi sebagai mulsa sekaligus sebagai sumber bahan organik. Selanjutnya pemangkasan dilakukan kembali dengan selang waktu 40-60 hari.

Pembuatan saluran pembuangan air (SPA)

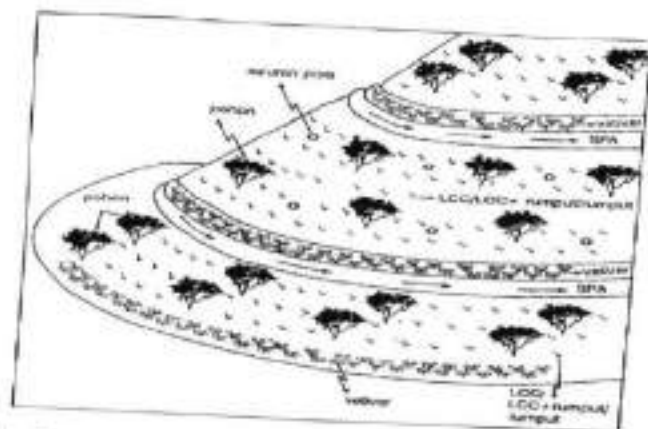
Air hujan yang mengalir di permukaan areal/lahan timbunan perlu dikendalikan agar tidak menyebabkan erosi berat. Pada, bidang datar dibuatkan saluran pembuangan air (SPA) yang terus turun ke bidang lereng sampai ke teras bawah. Saluran pembuangan air ini perlu diperkuat dengan batu-batuan atau ditanami rumput (*grass waterways*). Jarak antar SPA tergantung kondisi di lapangan (Gambar 4).



Gambar 4. Sistem saluran pembuangan air (SPA)

Stabilisasi bidang datar dengan legum penutup tanah, atau rumput pakan ternak dan pohon-pohonan untuk penghijauan

- Pada bidang datar perlu, segera ditanam LCC atau rumput pakan ternak yang mampu beradaptasi dengan kondisi areal timbunan. Penanaman diatur agar serasi dan memiliki nilai estetika.
- Areal timbunan secepatnya ditanami pohon-pohonan pioner yang mempunyai adaptasi tinggi terhadap lingkungan setempat, mengingat bahan galian pasca penambangan batubara ini belum matang kondisinya. Yang ditanam adalah pohon-pohonan yang mempunyai fungsi untuk mengendalikan curahan air hujan dan meningkatkan bahan organik. Lubang tanam, setelah dibuat perlu dibiarkan terbuka selama 1-2 minggu, selanjutnya diisi penuh dengan pupuk kandang yang dicampur dengan tanah lapisan atas, kemudian diberi, kapur pertanian dan pupuk N, P, dan K. Pola pengembangan reklamasi lahan pasca penambangan yang berbentuk teras-teras seperti terlihat pada Gambar 5a dan 5b.
- Blamana bahan timbunan sudah mengalami pematangan, maka untuk jangka panjang dapat ditanam pohon-pohonan yang bernilai ekonomis seperti pohon buah-buahan, tanaman industri/perdagangan, dll, tetapi dengan pengelolaan yang intensif.



Gambar 5a. Suatu model pengembangan tanaman reklamasi di areal timbunan



Gambar 5b. Tahap lanjut dari lahan pasca penambangan yang direklamasi kondisi areal timbunan setelah 14 tahun direklamasi, di PTBA Bukit Asam, Tanjung Enim, Sumatera Selatan (Foto: S. H. Tala'ohu dan D. Erfandi)

Lahan timbunan yang tidak diberi lapisan atas tanah merah

Bahan galian yang berasal dari endapan marin banyak mengandung senyawa pirit (FeS_2) dan setelah terangkat di permukaan akan mengalami perubahan lingkungan dari keadaan reduksi/anaerob menjadi kondisi oksidasi/aerob. Perubahan ini menyebabkan senyawa pirit berubah menjadi ion feri (Fe^{2+}), ion sulfat (SO_4^{2-}) dan ion H^+ . Ion SO_4^{2-} dan H^+ mengakibatkan lingkungan tanah menjadi ber-pH rendah atau sangat masam. Selanjutnya ion SO_4^{2-} dengan Mg , Ca , Al , dan lain-lain kation akan membentuk senyawa garam. Garam-garam khususnya Magnesium dan Natrium juga tinggi dan di musim kemarau biasanya tampak seperti kerak putih di permukaan tanah. Kandungan garam yang cukup tinggi akan menghambat pertumbuhan dan perkembangan tanaman terutama pada musim kemarau atau pada saat kondisi tanahnya kekeringan.

Hanya tanaman-tanaman tertentu saja yang bersifat pioner dapat tumbuh, dan umumnya tidak bernilai ekonomis. Untuk menghindari senyawa-senyawa garam tersebut, perlu dibuat parit-parit drainase atau saluran agar di musim hujan, garam-garam ini tercuci sehingga konsentrasinya sedikit demi sedikit berkurang, dan tanaman terhindar dari bahaya garam. Lahan timbunan juga mengandung beberapa logam berat seperti *Chrom (Cr)*, *Cadmium (Cd)*, *Plumbum (Pb)*, *Hidrangirium (Hg)* walaupun konsentrasinya masih berada di bawah ambang batas namun tetap perlu diwaspadai karena bersifat akumulatif di bagian akhir rantai makanan.

Apabila areal timbunan berbentuk teras atau stupa, maka saluran drainase dibuat dari atas memotong Saluran Pembuangan Air. Namun kalau timbunan berbentuk datar atau cembung tidak berteras maka perlu dibuat parit/saluran drainase untuk pencucian garam-garam dan penanaman LCC, jenis rumput dilakukan pada bedengan/guludan.

Vegetatif

Upaya reklamasi lahan pasca penambangan batubara secara vegetatif sering mengalami berbagai hambatan berupa lambatnya pertumbuhan tanaman bahkan persentase kematian cukup tinggi. Menurut Sudjadi (1996), terdapat dua tahap dalam usaha mereklamasi lahan pasca penambangan yakni: 1) pemulihan kondisi lahan setelah penambangan; dan 2) persiapan areal pasca penambangan yang sudah diperbaiki untuk pemanfaatan berikutnya.

Ameliorant

Setelah lahan timbunan dianggap selesai ditimbun, kegiatan selanjutnya adalah menanam lahan timbunan dengan tanaman yang bernilai ekonomi. Upaya reklamasi lahan timbunan dapat dilakukan antara lain dengan pemberian bahan pembenah tanah, misalnya: bahan organik, kapur, dolomit, fosfat alam, teak baja, bitumen, abu batubara, dan zeolit. Bahan organik dapat berasal dari pupuk

kandang, pupuk hijau, sisa panen, limbah *sawmill*, dan lain sebagainya. Pupuk hijau dapat diusahakan melalui tanaman kacang-kacangan penutup tanah, rumput-rumputan, atau daun pohon-pohonan.

Reklamasi kolam pasca penambangan

Tingkat kemasaman air kolam dapat dibedakan menjadi dua yaitu air kolam ber-pH > 5,0 dan air kolam ber-pH < 5,0. Air kolam yang mempunyai pH rendah berasal dari tanah berbatuan induk aluvium marin yang dipengaruhi air laut. Daya hantar listrik (DHL) dan sodium adsorption ratio (SAR) air kolam umumnya cukup baik, sehingga air kolam dapat dimanfaatkan untuk irigasi lahan pertanian, namun air kolam yang ber-pH rendah perlu ditingkatkan sebelum digunakan untuk keperluan domestik.

Kolam yang tidak terfalu dalam secara teknis lebih mudah ditimbun kembali. Kolam yang berhubungan dengan perairan umum seperti sungai dan laut mempunyai keanekaragaman biologi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kolam yang hanya menerima air hujan dan mata air. Penimbunan kolam yang berukuran kecil dilakukan dengan menggunakan bahan galian dari lapisan bawah, selanjutnya tanah dari *dumping area*, dan yang paling atas adalah tanah *top soil* yang sudah dipisahkan sebelum melakukan penambangan. Selanjutnya dilakukan upaya peningkatan kesuburan tanah dengan pemberian bahan ameliorant berupa kapur, bahan organik, abu batubara, atau zeolit. Setelah itu, maka dilanjutkan dengan penanaman *cover crop* dan tanaman kayu-kayuan yang adaptif.

Fungsi kolam antara lain sebagai: (a) tempat penampungan air limpasan, mencegah banjir, dan sumber air irigasi; (b) habitat berbagai jenis hewan dan tumbuhan air; serta (c) dapat digunakan sebagai obyek wisata air.

Semakin tua usia kolam semakin tinggi tingkat keanekaragaman hayatinya. Proses reklamasi kolam dapat dilakukan dengan cara diberi kapur/dolomit untuk meningkatkan pH. Reklamasi kolam untuk usaha perikanan diawali dengan pemberian kapur dan dolomit (pengapuran) untuk meningkatkan pH air kolam. Caranya kapur dan dolomit dilarutkan dalam air, kemudian diberikan di permukaan kolam. Setelah satu minggu, pH air diukur. Jika pH air sudah menunjukkan 6 – 7 berarti sudah aman untuk usaha perikanan.

Bibit ikan berukuran panjang 4-5 cm ditabur di dalam jaring untuk adaptasi terlebih dahulu. Setelah setengah bulan bibit ikan siap dilepas di kolam tersebut. Jenis ikan yang dapat diusahakan antara lain nila, mujaer, dan sepat. Pada kolam yang berukuran 20 m x 7 m x 3 m populasi ikannya sekitar 3.000 ekor. Pemberian pakan 4 kali sehari untuk ikan berumur kurang dari 3 bulan dengan takaran 1 – 3 kg /hari. Setelah ikan berumur 3-5 bulan maka setiap 1.000 ekor diberi pakan sebanyak 4 kg /hari. Ikan sudah dapat dipanen setelah berumur 5-6 bulan.

Teknologi Reklamasi Lahan Pasca Penambangan

Pembenah Tanah

Kondisi areal timbunan yang belum stabil mempunyai kandungan garam sulfat relatif tinggi, kepadatan tanahnya tinggi, drainase jelek, permeabilitas lambat, pH sangat masam, miskin bahan organik, dan unsur hara. Adaptasi beberapa jenis tanaman dalam kondisi ekstrim seperti ini berkontribusi pada tingkat kematian dan proses pertumbuhan tanaman (Sudjadi 1996). Menurut Adiningsih dan Sudjadi (1993), apabila kadar bahan organik dalam tanah rendah, maka efisiensi pemupukan juga rendah. Upaya peningkatan kadar bahan organik pada areal timbunan dapat ditempuh melalui penggunaan pupuk kandang, pemberian mulsa, dan penanaman jenis tanaman legum penutup tanah.

Salah satu cara untuk mempercepat perbaikan atau terbentuknya media tumbuh tanaman dari bahan timbunan adalah dengan pemberian bahan pembenah tanah (*ameliorant*) seperti kapur pertanian, dolomit, gypsum, bahan tras (tufa), bitumen, kompos, gambut, pupuk kandang, abu (kayu, batubara), terak baja, atau ampas tebu. Hasil penelitian Puslittanak (1995) menunjukkan bahwa pupuk kandang, dolomit, dan abu batubara dapat digunakan sebagai bahan pembenah tanah untuk reklamasi areal timbunan (Gambar 6). Bahan pembenah tanah diberikan dalam bentuk lankan dimana benih/bibit tanaman jenis LCC dan rumput akan ditanam.



Gambar 6. Alternatif bahan pembenah tanah (pupuk kandang, dolomit/kapur, abu batubara) untuk reklamasi areal lahan timbunan (Foto: G. Syamsidi dan S. H. Tala'ohu)

Tanaman Tahunan

Penanaman tanaman tahunan menggunakan sistim pot. Pembuatan lubang tanam berukuran 50 cm x 50 cm x 50 cm dapat menggunakan traktor, cangkul, dan/atau garpu. Pupuk dasar yang diberikan adalah pupuk kandang (10 kg lubang/tanam), P-Alam (1 kg lubang /tanam), kapur pertanian (0,5 kg lubang /tanam), urea (0,25 kg lubang /tanam), dan KCl (0,15 kg lubang /tanam). Pupuk kandang, P-alam, kapur pertanian/dolomit diberikan bersamaan dengan waktu tanam yakni diaduk dengan tanah urugan, sedangkan urea dan KCl diberikan 2-4 minggu setelah tanam dengan cara ditugal sekeliling pokok tanaman. Pemupukan selanjutnya dilakukan 2 kali dalam satu tahun sampai tanaman berumur 2 tahun (awal musim hujan dan awal musim kemarau) dengan dosis urea, P-Alam/TSP, dan KCl masing-masing: 0,25; 0,25; 0,15 kg /pohon. Pemeliharaan yang dilakukan meliputi penyulaman tanaman yang mati, penyiangan per jalur tanaman, pendangiran atau pembuatan piringan per pokok tanaman, dan pembuatan guludan individu pada setiap pokok tanaman agar tanaman tidak tergenang air pada musim hujan, pembenan mulsa juga dilakukan pada setiap pokok tanaman guna mengendalikan pertumbuhan gulma dan mengurangi evaporasi. Jenis tanaman tahunan yang beradaptasi baik dengan kondisi lahan pasca penambangan batubara antara lain: sungkai, mahoni, angkana, jambu mente, kemiri, dan nangka (Moersidi S 1997; Sidik *et al.* 1998b) sehingga dapat dijadikan sebagai vegetasi reklamasi lahan pasca penambangan (Gambar 7).





Gambar 7. Alternatif tanaman tahunan (Sungkal, Mahoni, Angsana, Jambu Mente, Kemiri, Nangka) sebagai vegetasi reklamasi lahan pasca penambangan (Foto: G. Syamsidi dan S. H. Tala'ohu)

Tanaman Penutup Tanah

Jenis tanaman penutup tanah, seperti leguminosa dan rumput-rumputan tertentu mempunyai kemampuan untuk tujuan tersebut. Namun untuk mencapai tingkat pertumbuhan yang optimal, diperlukan tambahan pupuk, misalnya Urea, P-Alam/TSP dan KCl sebagai sumber hara serta kapur pertanian/dolomit. Jenis rumput, seperti *Bracharia decumbens* (rumput BD), *Panicum maximum* (rumput benggala), *Vetiveria zizanioides* (rumput Vetiver), *Paspalum sp.*, *Penisetum purpureum* (rumput gajah), *Penisetum purpurioles* (rumput raja), dan jenis LCC seperti *Centrosema sp.*, *Peuraria sp.*, *Calopogonium sp.* (Moersidi S 1997; Sidik et al. 1998b) dapat digunakan sebagai tanaman penutup tanah (Gambar 8).



Gambar 8. Alternatif tanaman penutup tanah (*Centrosema*, *Calopogonium*, *Peuraria*, *Rumput Paspalum*, *Rumput BD*, *Vetiver*) (Foto: G. Syamsidi dan S. H. Tala'ohu)

Penanaman LCC sebaiknya dilakukan pada bedengan guna mengurangi pengaruh garam-garam. Penanaman tanaman penutup tanah sebaiknya dengan cara dicampur untuk lebih meningkatkan efektivitasnya dalam menutupi permukaan tanah sekaligus sebagai sumber bahan organik, dan dilakukan pada awal musim hujan sehingga air masih cukup tersedia untuk menunjang pertumbuhan awal. Jenis LCC ditanam dengan menggunakan sistim larikan, sedangkan jenis rumput-rumputan ditanam dengan menggunakan polis atau stek dengan jarak tanam 50 cm x 50 cm. Pada bidang miring atau tampingan, larikan untuk penanaman LCC dibuat mengikuti kontur sedangkan penanaman jenis rumput dilakukan secara zig-zag sehingga lebih efektif untuk pengendalian erosi dan aliran permukaan.

Indikator Ramah Lingkungan Dan Sumber Pembiayaan Reklamasi Lahan Pasca Penambangan

Indikator Ramah Lingkungan Kegiatan Penambangan

Kebijakan reklamasi telah diatur dalam berbagai perangkat peraturan perundangan antara lain a). Undang-Undang Nomor: 11 tahun 1967 tentang Ketentuan-Ketentuan Pokok Pertambangan; b). Peraturan Pemerintah Nomor: 32 tahun 1969 tentang Pelaksanaan Undang-Undang Nomor 11 tahun 1967; c). Peraturan Pemerintah Nomor: 75 tahun 2001 tentang Perubahan Kedua atas Peraturan Pemerintah Nomor: 32 tahun 1969; d). Keputusan Menteri Pertambangan dan Energi Nomor: 1211 tahun 1995 tentang Pencegahan dan Penanggulangan Perusakan dan Pencemaran Lingkungan pada Kegiatan Pertambangan Umum; e). Keputusan Dirjen Pekerjaan Umum Nomor: 336 tahun 1996 tentang Jaminan Reklamasi; dan f). Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 04 Tahun 2012 tentang indikator ramah lingkungan untuk usaha dan/atau kegiatan penambangan.

Kegiatan penambangan terbuka, seperti halnya penambangan batubara merupakan salah satu bentuk kegiatan yang berdampak penting terhadap rona lingkungan hidup. Dampak tersebut bisa berupa dampak negatif, apabila tidak dilakukan dengan cara yang semestinya, dan dampak kegiatan penambangan tidak dikelola secara seksama. Sebaliknya, dampak kegiatan penambangan bisa bersifat positif, jika kegiatan penambangan sesuai prosedur dan dampaknya dikelola dengan sebaik-baiknya. Bentuk dampak negatif kegiatan penambangan antara lain: terjadinya banjir, longsor, pencemaran lingkungan air, udara, dan tanah, dan lahan-lahan marginal, sedangkan bentuk dampak positifnya antara lain peningkatan pendapatan asli daerah (PAD), terbukanya kesempatan kerja dan meningkatnya pendapatan penduduk setempat.

Guna mengawal kegiatan penambangan sedemikian rupa sehingga tidak terjadi dampak negatif, pemerintah sudah menentukan indikator ramah lingkungan kegiatan penambangan. Indikator ramah lingkungan adalah kriteria yang menunjukkan penerapan aspek perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup, khususnya pada kegiatan penambangan.

Sesuai dengan isi Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor: 04 Tahun 2012 tentang Indikator Ramah Lingkungan untuk Usaha dan/atau Kegiatan Penambangan Terbuka Batubara (SNRI 2012), para pengusaha atau penanggung jawab kegiatan penambangan perlu memperhatikan dan memenuhi indikator ramah lingkungan pada setiap tahapan dan kegiatan penambangan. Indikator ramah lingkungan tersebut hanya akan dapat dicapai apabila pihak penanggung jawab kegiatan atau pemrakarsa penambangan berpegang teguh pada hasil analisis mengenai dampak lingkungan (AMDAL), terutama dokumen Rencana Pengelolaan Lingkungan Hidup (RKL) dan Rencana Pemantauan

Lingkungan Hidup (RPL). Secara keseluruhan indikator ramah lingkungan kegiatan penambangan batubara yang harus dipenuhi oleh pemrakarsa kegiatan penambangan mulai tahap penambangan, reklamasi dan pasca penambangan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Indikator ramah lingkungan untuk usaha atau kegiatan penambangan terbuka.

Tahapan	Kegiatan	Indikator
A. Penambangan	1. Pengupasan, penimbunan, dan pengelolaan tanah pucuk	a. Tanah pucuk tidak tercampur dengan tanah atas batuan penutup b. Tidak terjadi erosi atau longsor lebih dari 15% dari luas timbunan tanah pucuk c. Timbunan tanah pucuk ditanami tanaman penutup dengan baik
	2. Pengupasan, penimbunan, dan pengelolaan tanah/ batuan penutup	a. Batuan potensial pembentuk asam dienkapsulasi b. Tidak terjadi erosi dan atau longsor yang mengganggu enkapsulasi dan/atau lebih dari 15% dari luas timbunan tanah/batuan penutup c. Timbunan tidak terlalu tinggi dan tidak terlalu terjal dengan kemiringan sesuai dengan kajian geoteknik d. Tidak terjadi rembesan air di kaki timbunan yang pH-nya kurang dari 4 e. Timbunan tanah/batuan penutup ditanami tanaman penutup dengan baik
	3. Penggalian dan pengambilan batubara	a. Luas permukaan lubang galian yang terbentuk tidak lebih dari 20% dari luas galian usaha penambangan (IUP) apabila lubangnya terkonsentrasi atau 30% dari luas IUP jika lubangnya terfragmentasi dan setiap lubang tidak lebih dari 20% dari luas IUP b. Jarak tepi lubang galian paling sedikit 500 m dari batas IUP c. Tidak dijumpai penurunan pH air tanah lebih dari satu tingkat dari kondisi awal d. Tidak menyebabkan air permukaan yang keluar dari IUP kualitasnya lebih rendah dari baku mutu air limbah
B. Reklamasi	1. Penataan lahan pasca penambangan sesuai peruntukannya	a. Kemiringan lahan sesuai dengan peruntukkan lahan dan kajian geoteknik b. Tidak terjadi genangan permanen, kecuali pada lokasi lubang yang tidak ditutup c. Air permukaan/genangan pada lubang galian akhir yang tidak ditutup memiliki kualitas yang sesuai dengan baku mutu peruntukkan air
	2. Penutupan lubang (yang harus ditutup) dengan tanah/batuan penutup dan tempat penimbunan	a. Tidak dijumpai batuan potensial masam yang teroksidasi b. Tidak dijumpai penurunan pH air tanah lebih dari satu tingkat dari kondisi awal

C. Pasca Tambang	3. Penyebaran tanah pucuk dari tempat penimbunan menutupi tanah/batuan penutup pada bekas lubang galian (yang harus ditutup)	a. Tanah pucuk tersebar merata pada lebih dari 75% dari keseluruhan lahan reklamasi b. Tanah pucuk pada zona perakoran memiliki pH tanah yang sesuai dengan peruntukannya
	4. Penanaman sesuai peruntukannya	a. Tahun pertama: lebih dari 80% dari luas areal reklamasi ditumbuhi tanaman penutup tanah b. Tahun kedua: lebih dari 80% dari luas reklamasi ditumbuhi oleh tanaman cepat tumbuh
	1. Penataan lahan pasca penambangan sesuai dengan peruntukannya	Luas permukaan bekas lubang galian yang terbentuk tidak lebih dari 20% dari luas IUP apabila lubangnya terkonsentrasi atau tidak lebih dari 30% dari luas IUP apabila lubangnya terfragmentasi dan setiap lubang tidak lebih dari 20% dari luas IUP
	2. Penanaman sesuai dengan peruntukannya	a. Tahun pertama: lebih dari 90% luas lahan sesuai peruntukkan ditutupi tanaman penutup tanah dan ada perbaikan kesuburan tanah (peruntukkan hutan, perkebunan, pertanian lahan kering, sawah, perikanan darat, dan pariwisata) b. Tahun kedua: lebih dari 90% luas lahan peruntukkan hutan ditumbuhi tanaman. Lebih dari 60% luas lahan peruntukkan perkebunan, pertanian lahan kering, dan/atau sawah ditumbuhi tanaman. Lebih dari 30% dari luas lahan peruntukkan perikanan dan pariwisata ditumbuhi tanaman. c. Tahun ketiga dan seterusnya: lebih dari 90% luas lahan sesuai peruntukkan ditumbuhi tanaman.

Sumber: Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor: 04 Tahun 2012 tentang Indikator Rantai Lingkungan untuk Usaha dan/atau Kegiatan Penambangan Terbuka Batubara

Sumber Pembiayaan Kegiatan Reklamasi

Kerusakan lingkungan hidup akibat kegiatan penambangan dapat diamati di berbagai lokasi pasca penambangan. Kerusakan lingkungan hidup, khususnya pada sumber daya lahan adalah perubahan langsung dan/atau tidak langsung terhadap sifat fisika, kimia, dan/atau hayati tanah yang melampaui kriteria baku kerusakan lingkungan hidup. Dampak kerusakan terhadap sumber daya lahan tersebut, jika tidak direklamasi dengan baik akan mempengaruhi lingkungan biofisik, sosial, budaya, dan ekonomi masyarakat.

Salah satu kendala kegiatan reklamasi lahan pasca penambangan adalah terkait dengan sumber pendanaan untuk reklamasi. Pihak pemrakarsa kegiatan penambangan dan pemerintah daerah dimana lokasi pasca penambangan berada

mengeluarkan biaya untuk melaksanakan kegiatan reklamasi tersebut. Hal tersebut sebenarnya tidak beralasan karena kegiatan penambangan merupakan kegiatan ekonomi yang berdampak penting terhadap lingkungan hidup. Sebelum dilaksanakan kegiatan penambangan, selalu ada kewajiban untuk melakukan analisis kelayakan lingkungan. Apabila suatu rencana kegiatan penambangan memperoleh ijin eksploitasi, maka sudah tercakup di dalamnya keharusan untuk melakukan kegiatan reklamasi pada tahapan pasca penambangan. Pembiayaan reklamasi lahan pasca penambangan sudah tentu bersumber dari pihak pemrakarsa penambangan, baik yang dicadangkan untuk perbaikan lingkungan maupun berbagai pajak dan/atau retribusi yang disetorkan kepada pemerintah, baik Pemerintah Pusat maupun Pemerintah Daerah.

Salah satu contoh di Kab. Lebak, Prov. Banten, sumber pembiayaan untuk kegiatan reklamasi lahan pasca penambangan diatur berdasarkan Peraturan Daerah (Perda) Kab. Lebak Nomor: 7 tahun 2004 tentang Pengelolaan Pertambangan Umum, mencakup:

1. Iuran tetap (*land rent*): iuran dari pemegang hak pertambangan kepada Pemkab sebagai imbalan atas kesempatan melakukan usaha pertambangan, satuannya dalam Rp/ha/th selama kegiatan operasi penambangan.
2. Iuran produksi (*royalty*): iuran dari pemegang hak pertambangan kepada Pemerintah sebagai imbalan atas produksi bahan galian, satuannya dalam % dari nilai produksi.
3. Tarif pajak pengambilan bahan galian skala menengah sampai besar: 10% dari nilai jual bahan galian yang ditambang.
4. Retribusi surat ijin penambangan umum (SIPU), terdiri atas Kuasa Pertambangan dan surat ijin pertambangan galian industri (SIPGI) dengan rincian sebagai berikut:

a. Kuasa Pertambangan:

- Eksploitasi : Rp 5.000.000,-
- Pemurnian dan pengolahan : Rp 5.000.000,-
- Pengangkutan dan penjualan : Rp 5.000.000,-

b. SIPGI:

- Eksploitasi : Rp 2.500.000,-
- Pemurnian dan pengolahan : Rp 1.250.000,-
- Pengangkutan dan penjualan : Rp 1.250.000,-

Berdasarkan informasi tersebut maka sumber pembiayaan yang cukup besar akan diperoleh dari bentuk royalti penambangan dan pajak pengambilan karena berhubungan langsung dengan jumlah produksi bahan tambang yang diperoleh pengusaha.

Penutup

Cara penggalian dan pengembalian tanah pasca penambangan batubara dengan sistem terbuka menyebabkan berbagai kerusakan fisika, kimia, dan biologi. Bahan timbunan selain miskin unsur hara makro (N, P, K) juga mengandung garam cukup tinggi yang dapat membahayakan pertumbuhan tanaman, rawan erosi, dan longsor. Pengelolaan lahan untuk mengembalikan hara, bahan organik tanah, dan pembuatan saluran drainase guna mempercepat dan memperlancar proses pencucian garam-garam. Lahan timbunan mengandung logam berat seperti: *Chrom (Cr)*, *Cadmium (Cd)*, *Plumbum (Pb)*, *Hidargirium (Hg)* walaupun konsentrasinya masih berada di bawah ambang batas, namun harus diwaspadai karena bersifat akumulatif di bagian akhir rantai makanan.

Pemberian bahan pembenah tanah seperti pupuk kandang berpengaruh baik terhadap pori aerasi dan permeabilitas tanah. Upaya pencegahan erosi, pendangkalan kolam pengendapan, dan penghijauan areal timbunan perlu dilakukan sejak dini, yakni pada areal timbunan yang sudah selesai kegiatan penimbunan, antara lain melalui penanaman strip rumput Vetiver terutama di bidang miring/tampungan teras mengikuti kontur, disertai dengan pengaturan sistem saluran pembuangan air (SPA) dan saluran teras atau saluran peresapan.

Pada areal timbunan yang sudah lama, tanaman *legume cover crop* yang adaptif adalah *Centrosema pubescens*, *Peuraria javanica*, *Calopogonium mucunoides*, dan *Arachis pentolii* sedangkan dari jenis rumput adalah: *Paspalum sp.*, *Brachiaria decumbens*, *Panicum maximum*, *Pennisetum purpureum*, *Pennisetum purpureoides*, dan *Vetiveria zizanioides*. Jenis tanaman perkebunan yang dapat beradaptasi cukup baik pada areal timbunan adalah: sukun, jambu mete, kemiri, dan nangka, sedangkan tanaman kayu-kayuannya adalah: lamtoro, sungkal, bambu, glirisidia/gamal, mahoni, randu, albizia, angkana, arborea, dan johar.

Kegiatan penambangan dan hasil reklamasi lahan pasca penambangan pada akhirnya harus memenuhi indikator ramah lingkungan sehingga lahan pasca penambangan tersebut benar-benar dapat bermanfaat bagi kehidupan masyarakat sekitar. Apabila dapat dikelola dengan baik, maka di masa mendatang, lahan timbunan pasca penambangan batubara merupakan salah satu sumber daya yang berpotensi besar untuk mendukung pembangunan pertanian, baik untuk perkebunan, tanaman pangan, hortikultura, dll. Pemanfaatan lahan timbunan untuk ekstensifikasi atau perluasan areal pertanian berpeluang cukup besar sehingga perlu didorong dan ditingkatkan sebagai upaya adaptasi terhadap perubahan iklim global dan peningkatan produksi pertanian untuk mendukung program ketahanan pangan nasional.

Sumber pembiayaan reklamasi lahan pasca penambangan secara aspek legal tersedia. Permasalahannya terletak pada kemauan Pemerintah setempat untuk mengalokasikan dana tersebut sesuai peruntukannya dan kesediaan

pemrakarsa untuk menerapkan teknologi ramah lingkungan sejak tahap eksploitasi dan reklamasinya. Di pihak lain, peran masyarakat dalam pengawasan proses penambangan dan reklamasi lahan pasca penambangan sangat menentukan keberhasilan pemanfaatan lahan pasca penambangan menjadi lahan yang produktif.

Daftar Pustaka

- Adiningsih, S dan M. Sudjadi. 1993. Peranan sistem pertanaman lorong (*alley cropping*) dalam meningkatkan kesuburan tanah pada lahan kering masam. Hal. 30-40 dalam Risalah Seminar Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat, Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Dai, J. 1993. Identifikasi dan Karakterisasi Lapisan Sedimen di Tambang Batubara Bukit Asam. Laporan Akhir Reklamasi, Penelitian dan Pengembangan Sumber daya Lahan Serta Pelatihan. Kerja Sama PTBA dengan Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor. (Tidak dipublikasikan).
- Dai, J, dan Suseno. 1993. Kondisi Lahan dan Kendala Reklamasi di Daerah Damping di PTBA Tanjung Enim. Dok. Puslittanak. (Tidak dipublikasikan).
- Moersidi S. 1997. Pengujian Adaptasi Tanaman Tahunan dalam Usaha Penghijauan Lahan Timbunan Bekas Tambang Batubara di PTBA Tanjung Enim. Laporan Akhir Pengujian Teknologi Reklamasi, Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Lahan serta Pelatihan dan Pengembangan Reklamasi Terpadu Lahan Bekas Tambang batubara Tahap III, Kerjasama PT, Tambang Batubara Bukit Asama (Persero) dengan Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor. (Tidak dipublikasikan).
- Mulyani, A., M. Soekardi, J. Sri Adiningsih, dan Ladiyani R.W. 1995. Perbandingan campuran tanah merah dan *blue clay* untuk dasar reklamasi lahan di PTBA Tanjung Enim dengan indikator tanaman Jagung. Hal. 69-86 dalam Prosiding Pembahasan Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bidang Fisika, Konservasi Tanah dan Air dan Agroklimat, Bogor, 26-28 September 1995. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Mulyani, A., dan M. Soekardi. 1998. Karakterisasi tanah dan penataan ruang makro kawasan penambangan batubara di PTBA Ombilin, Sumatera Barat. Hal. 55-72 dalam Prosiding Pembahasan Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bidang Pedologi. Bogor, 10-12 Februari 1998. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor.

- Puslittanak (Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat). 1993. Laporan Akhir. Reklamasi, Penelitian dan Pengembangan Sumber daya Lahan serta Pelatihan. Kerja Sama PTBA Tanjung Enim dengan Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor. (Tidak dipublikasikan).
- Puslittanak. 1995. Laporan Akhir Pengujian dan Pengembangan Reklamasi Sumber Daya Lahan serta Pelatihan Tahun II Kerja Sama PTBA Tanjung Enim dengan Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor. (Tidak dipublikasikan)
- Rebno. L.W., Wiwik H., dan IPG. Widjaja Adhi. 1995. Penjajagan hara pada beberapa lapisan geologi di PTBA Tanjung Enim. Hal. 75-86 *dalam* Prosiding Pembahasan Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bidang Kesuburan dan Produktivitas Tanah. Bogor, 10-12 Januari 1995. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Sidik H. Tala'ohu, Moersidi, S., Sukristyonubowo, dan Gunawan. S. 1995. Sifat fisko-kimia tanah timbunan di PTBA Tanjung Enim, Sumatera Selatan. Hal. 39-48 *dalam* Prosiding Pembahasan Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bidang Fisika, Konservasi Tanah dan Air dan Agroklimat, Bogor, 26-28 September 1995. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Sidik H. Tala'ohu, S. Sukmana, D. Erfandi, dan D. Sudjarwadi. 1996. Reklamasi tanah timbunan sisa galian penambangan batubara dan monitoring erosi di PTBA Tanjung Enim. Hal. 41-59 *dalam* Prosiding Pembahasan Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bidang Fisika, Konservasi Tanah dan Air dan Agroklimat, Bogor, 21-23 Agustus 1996. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Sidik H. Tala'ohu, Moersidi, S. Sukristyonubowo, J. Purnomo, dan G. Syamsidi. 1998a. Penggunaan ameliorant untuk perbaikan sifat fisik dan kimia tanah serta pertumbuhan tanaman penutup tanah pada areal timbunan sisa galian penambangan batubara di PTBA Tanjung Enim. Hal. 23-41 *dalam* Prosiding Pertemuan Pembahasan dan Komunikasi Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bidang Fisika, Konservasi Tanah dan Air serta Agroklimat dan Hidrologi. Bogor, 10-12 Februari 1998. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Sidik H. Tala'ohu, G. Syamsidi, dan Deddy Erfandi. 1998b. Adaptasi beberapa jenis tanaman buah-buahan dan kayu-kayuan dalam upaya penghijauan lahan timbunan pasca penambangan batubara. Prosiding Seminar Nasional Sumber Daya Lahan. Cisarua, Bogor tanggal 9-11 Februari 1999. Bidang Fisika, Konservasi Tanah dan Air serta Agroklimat dan Hidrologi. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor.

- Soekardi M., A. Mulyani, dan A. Surya. 1995. Karakterisasi Tanah dan Penataan Ruang Kawasan Penambangan Batubara di PTBA Tanjung Enim. Laporan Akhir Pengujian dan Pengembangan Reklamasi, Sumber Daya Lahan serta Pelatihan tahun II Kerja Sama PTBA dengan Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor. (Tidak dipublikasikan).
- Sudjadi M. 1996. Reklamasi dan Reboisasi Areal Bekas Tambang. Makalah disajikan pada pertemuan teknis pengelolaan lingkungan. Departemen Pertambangan dan Energi 1995/1996, Ditjen Reboisasi dan Rehabilitasi Lahan, Departemen Kehutanan. (Tidak dipublikasikan).
- SNRI (Sekretariat Negara Republik Indonesia). 2009. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2009 Nomor 140. Jakarta.
- SNRI (Sekretariat Negara Republik Indonesia). 2012. Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No 04 Tahun 2012 tentang Indikator Ramah Lingkungan untuk Usaha dan/atau Kegiatan Penambangan Terbuka Batubara. Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2012. Jakarta.
- Widjaja Adhi, IPG. 1993. Penjajagan Hara/Kendala Tanah Berbagai Lapisan di PTBA Tanjung Enim. Laporan Akhir Reklamasi, Penelitian dan Pengembangan Sumber daya Lahan serta Pelatihan. Kerja Sama PTBA dengan Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor. (Tidak dipublikasikan).
- Widdowson J.P. 1984. Application of Land Rehabilitation Techniques to Return Mined Land to Productive Farming And Presting Uses. Manuskrip, PTBA.

9. EFISIENSI PENGGUNAAN AIR PADA PERTANIAN LAHAN KERING DALAM UPAYA ADAPTASI TERHADAP PERUBAHAN IKLIM

S. Sutono dan Umi Haryati
Peneliti Balitbangtan di Balai Penelitian Tanah

Pendahuluan

Hubungan antara tanah – air – tanaman telah banyak dikaji oleh para pakar pertanian. Tanah sebagai tempat berjangkarnya akar tanaman harus mampu menyediakan unsur hara bagi kebutuhan tanaman. Akar tanaman akan berkembang dengan baik pada tanah yang mempunyai struktur baik, yaitu kepadatannya tidak melampaui kemampuan akar tanaman untuk menembusnya. Tanah dengan struktur baik ini biasanya mampu menyimpan air yang masuk ke dalam tubuh tanah, mengisi pori-pori tanah untuk memudahkan akar tanaman mengambilnya. Ketika tanah sebagai penyedia unsur hara dan air pada kondisi terbaik maka sangat cocok dijadikan tempat budi daya tanaman. Tanaman tumbuh dan berkembang baik pada tanah yang mengandung hara cukup dan lengkap dengan tingkat kelembapan terjaga pada kapasitas lapang atau 100% air tersedia. Ketika keseimbangan antara hara dan air terganggu, terutama oleh ketiadaan air di dalam tubuh tanah, maka pertumbuhan tanamanpun terganggu. Oleh karena itu, faktor air dalam berusaha tani sangat menentukan produktivitas tanaman.

Sumber air utama untuk memenuhi kebutuhan tanaman pada sistem pertanian di Indonesia adalah curah hujan yang jatuh sesuai musim. Pada musim hujan biasanya terjadi kelebihan air sehingga menimbulkan banjir dan bencana lainnya, sedangkan pada musim kemarau ketersediaan air makin berkurang, termasuk sumber air permukaan yang mengalir di sungai-sungai dan yang ditampung di bendungan, cekdam, dan embung sehingga menimbulkan kekeringan.

Berdasarkan curah hujan yang jatuh ke permukaan bumi, di Indonesia dikenal bulan basah dan bulan kering. Disebut bulan basah jika pada bulan tersebut intensitas hujan > 200 mm dan tergolong bulan kering jika curah hujannya < 100 mm (Oldeman *et al.* 1975). Jumlah bulan basah dan bulan kering yang terjadi pada suatu daerah menentukan apakah daerah tersebut tergolong beriklim kering atau beriklim basah. Berusaha tani di daerah beriklim kering berbeda dengan di daerah beriklim basah. Pada lahan di daerah beriklim kering dengan bulan basah ≤ 5 bulan pola tanam yang mungkin dilaksanakan adalah padi – palawija – bera atau padi – bera atau palawija – bera. Lahan pertanian lebih lama tanpa tanaman dibandingkan dengan ada tanaman budi dayanya.

Budi daya tanaman semusim lebih memerlukan ketersediaan air secara berkepanjangan selama tanaman tersebut tumbuh dan berkembang, sedangkan tanaman tahunan lebih toleran terhadap adanya bulan kering karena mempunyai perakaran lebih dalam. Ketika air tidak tersedia, maka kerugian dari usaha tani tidak dapat dihindarkan. Untuk itu, perlu dilakukan suatu perencanaan usaha tani dengan pola tanam yang cocok agar mampu memberikan hasil yang maksimal.

Produksi padi di Indonesia pada tahun 2010 sebesar 66.469.394 ton yang dihasilkan oleh 5.001.220 jiwa, jika seluruh pekerja di bidang pertanian menghasilkan beras, maka setiap pekerja bidang pertanian mampu menghasilkan beras untuk 50 orang. Di Amerika pada tahun 2010/11 areal yang ditanami padi seluas 1,45 juta ha dengan produksi sebanyak 7,5 juta ton dan rata-rata produksi 8 t/ha. Setiap petani Amerika mampu memberi makan 50 orang (Rahman 2011). Melihat perbandingan kemampuan mencukupi pangan, maka petani Indonesia tidak kalah dengan petani Amerika. Walaupun pertanian di Amerika didesain sebagai pertanian besar dan modern.

Agar produksi pertanian lahan kering di Indonesia mampu menghasilkan bahan pangan yang lebih banyak, diperlukan teknologi yang mampu menurunkan resiko kegagalan panen. Faktor utama penyebab kegagalan panen adalah kelangkaan air (*water scarcity*) pada musim kemarau. Kelangkaan air pada sektor pertanian dapat ditanggulangi dengan melakukan penghematan dalam penggunaan air (efisiensi penggunaan air). Air yang diberikan ke lahan pertanian ditujukan hanya untuk memenuhi kebutuhan tanaman dan tidak berlebihan, apalagi tertuang ke sektor non pertanian.

Pertanian akan dihadapkan pada permasalahan kelebihan dan kekurangan air yang semakin serius yang disebabkan karena perubahan iklim sebagai dampak El Nino dan La Nina. Pada tahun 1997/1998 terjadi fenomena El Nino dengan tingkat kedahsyatan paling parah yang mengakibatkan musim hujan mundur 1 – 2 bulan atau 3 – 6 dasarian (Surmaini dan Sugianto 1999). Menurut Pawitan (1998), antara tahun 1898 – 1998 terjadi 25 kali El Nino dengan intensitas kuat sampai sedang. Fenomena yang selalu berulang antara El Nino yang menyebabkan kekeringan karena intensitas hujan rendah dan La Nina yang menyebabkan intensitas hujan tinggi mempunyai dampak kurang baik terhadap menyebabkan intensitas hujan tinggi mempunyai dampak kurang baik terhadap pertanian tanaman semusim. Tulisan ini membahas efisiensi penggunaan air untuk lahan pertanian, yaitu memberikan air sesuai dengan kebutuhan tanaman, tetapi tidak berlebihan agar efisiensi penggunaan air meningkat dan memberikan hasil panen yang maksimal sesuai dengan potensi produksi tanaman yang dibudidayakan.

Distribusi Curah Hujan

Pada musim hujan yang basah, air hujan yang jatuh ke bumi akan mengisi penampung air alami, yaitu tanah. Air hujan mengisi pori-pori tanah,

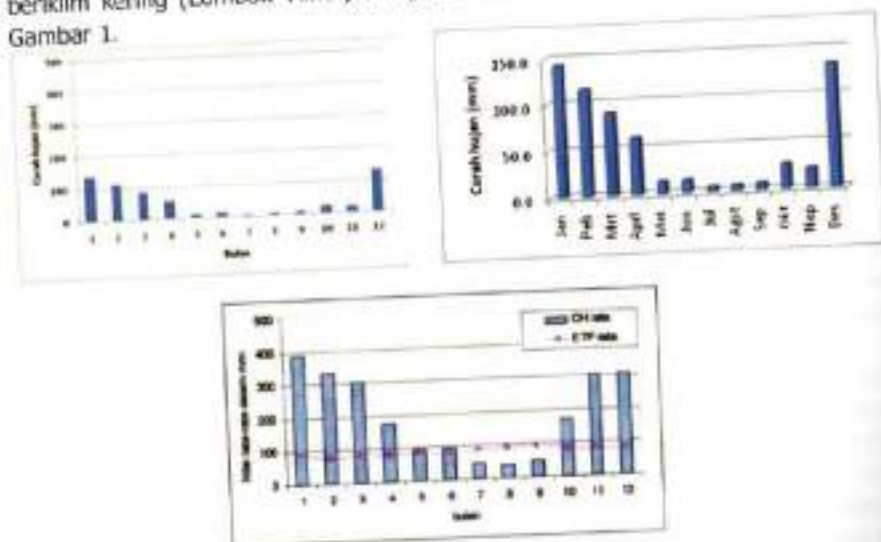
meresapkannya ke lapisan tanah di bawahnya, dan terus meresap secara gravitasi mengisi aquifer pada kedalaman tertentu. Sebagian air hujan yang tidak bisa meresap ke dalam tanah menjadi aliran permukaan (*Sunda: cileuncang*) yang mengalir mengisi daerah cekungan termasuk sungai, selokan, situ, danau, dan sebagainya. Lamanya musim hujan di Indonesia bervariasi tergantung kepada zone agroklimate. Menurut Oldeman *et al.* (1975) terdapat 5 zona agroklimate yaitu: (1) zone A wilayah yang mempunyai bulan basah > 9 bulan, secara berurutan; (2) zone B wilayah yang mempunyai bulan basah berurutan 7 sampai 9 bulan dan bulan kering berurutan 2, 3, dan 4 bulan; (3) zone C wilayah yang mempunyai bulan basah berurutan 5 bulan dan bulan kering berurutan 2 – bulan; (4) zone D wilayah yang mempunyai bulan basah berurutan 3 – 4 bulan dan bulan kering berurutan selama 2, 3, 4, 5, dan 6 bulan; dan (5) zone D wilayah dengan bulan basah berurutan < 3 bulan dan bulan kering berurutan > 5 bulan.

Selain bulan hujan yang berbeda sesuai dengan letak geografis, juga sering terjadi periode kering sesaat di musim hujan. Jumlah curah hujan yang banyak pada bulan tertentu dan sedikit bahkan tidak terjadi hujan pada bulan yang lain menyebabkan pola tanam pertanian di Indonesia berbeda satu sama lain. Perbedaan tersebut memberi hikmah, karena dapat dikembangkan komoditas unggulan tertentu sesuai dengan pola hujan dan perbedaan awal musim tanam bagi setiap daerah.

Di Indonesia, penetapan awal musim tanam sebagai bagian dari kalender tanam secara tradisional telah lama dikembangkan oleh petani secara turun-temurun dengan berbagai istilah yang berbeda pada setiap daerah. Petani di Jawa mengenal *pranata mangsa*, penunjuk waktu tanam, didasarkan kepada tanda-tanda alam. Kearifan lokal tersebut dimanfaatkan dengan baik ketika musim tanam padi satu atau dua kali setahun yang kemudian dikenal musim *rendeng* (musim hujan) dan musim gadu pada peralihan dari rendeng ke kemarau. Namun demikian, karena ahli *pranata mangsa* makin sedikit dan *keguyuban* makin berkurang, sedikit demi sedikit pengetahuan tersebut ditinggalkan. Dengan berkembangnya ilmu iklim maka para pakar klimatologi berpendapat bahwa kearifan lokal tersebut tidak dapat sepenuhnya dijadikan acuan dalam menetapkan awal musim tanam karena perubahan iklim dan semakin sulitnya menemukan indikator penanda musim. Berdasarkan kalender tanam suatu daerah dikatakan memasuki musim tanam ketika jumlah curah hujan yang jatuh mencapai 35 mm dasarian pada bulan terakhir setelah musim kemarau.

Walaupun awal musim hujan telah dimulai dan penanaman di musim hujan telah selesai dilakukan, tetapi lebih penting lagi adalah jumlah curah hujan setelah dilakukan penanaman. Jika 2 minggu saja tanpa hujan lagi, maka pertumbuhan tanaman akan terganggu. Karena itu, distribusi curah hujan selama musim hujan memegang peranan penting dalam penyediaan air untuk

memenuhi kebutuhan tanaman, terutama pada lahan kering. Beberapa pola hujan yang menggambarkan distribusi hujan sepanjang tahun di lahan kering beriklim kering (Lombok Timur, NTB) dan Pacitan di Jawa Timur tertera pada Gambar 1.

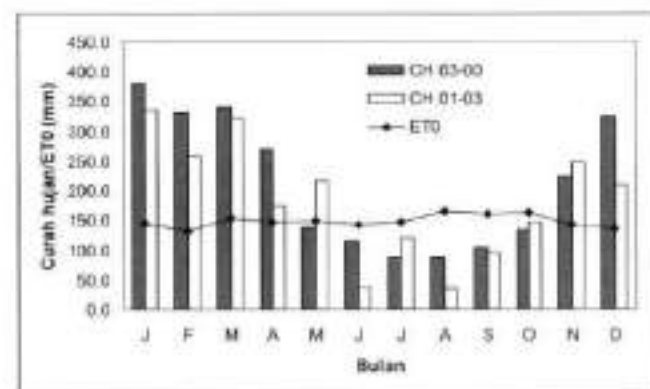


Gambar 1. Pola curah hujan di Suella, Kab. Lombok Timur, Nusa Tenggara Barat (kiri, Sudarman *et al.* 2010) dan Kab. Pacitan (kanan, Pujilestari *et al.* 2010)

Di Suella, Lombok Timur, curah hujan pada bulan Desember sampai April (5 bulan) setinggi > 50 mm tetapi pada bulan lainnya < 50 mm. Memperhatikan kriteria bulan basah > 200 mm/bulan yang dikemukakan oleh Oldeman *et al.* (1975), maka di Suella tidak terdapat bulan basah. Sebaliknya di Pacitan terdapat 5 bulan basah (November – Maret) dengan bulan kering berlangsung selama 3 bulan (Juli – September). Di Suella awal tanam bisa dimulai pada bulan Desember tetapi hanya satu musim tanam, sebab pada musim tanam ke dua yang diawali pada bulan Maret atau April akan menghadapi resiko kekeringan, karena curah hujan pada bulan Mei – September sangat rendah (< 50 mm). Di Pacitan awal tanam dapat dimulai pada Oktober tanpa ada kekhawatiran tanaman akan mengalami kelangkaan air hujan. Di KP Taman Bogo, Lampung Timur, awal musim tanam dapat dilakukan lebih awal, yaitu pada bulan September karena terdapat 6 bulan basah (curah hujan > 200 mm) dengan 2 – 3 bulan kering (curah hujan < 100 mm). Pola hujan di Taman Bogo disajikan pada Gambar 2.

Curah hujan yang jatuh ke permukaan bumi sebagian disimpan dalam pori-pori tanah. Air yang mengisi pori-pori inilah yang bermanfaat bagi

pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Kelembapan tanah terbaik untuk mendukung pertumbuhan tanaman semusim yang ditanam pada lahan kering berkisar pada kadar air kapasitas lapang, karena kapasitas air tersedianya terpenuhi semua atau sering disebut 100% air tersedianya.



Gambar 2. Rataan curah hujan (CH) tahun 1963 – 2000 dan 2001 – 2003 serta evaporasi tahun 2001-2003 di KP Taman Bogo (Sumber: Balittanah 2005)

Tanah Sebagai Reservoir Alamiah Air Hujan

Tanah mempunyai sistem rumit sebagai reservoir atau tangki air alamiah. Jika air yang tercurah ke permukaan bumi yang kering mempunyai intensitas tinggi dalam waktu yang singkat maka kemungkinan besar lebih banyak curah hujan yang menjadi aliran air permukaan (*run off*). Curah hujan tinggi yang jatuh ke permukaan bumi dalam waktu yang lama kemungkinan akan lebih banyak air yang masuk dan tersimpan di dalam tanah. Kemungkinan lain adalah air (Sunda: *cileuncang*) akan segera menggenang di permukaan tanah jika tanahnya sudah kedap atau sedikit pori-porinya. Hujan dengan intensitas rendah jatuh pada tanah yang basah dalam waktu yang sangat lama (> 8 jam) maka *cileuncang* juga muncul di permukaan tanah.

Perbedaan karakteristik tanah itulah yang menyebabkan jumlah air yang tersimpan di dalam pori-pori tanah tidak sama. Tanah bertekstur pasir mampu menyerap dan melalukan air dengan segera, tanah berlempung menyerap dan menyimpan air agak lama, tanah berlempung menyerap dan menyimpan air lebih lama dibandingkan kedua tekstur tanah sebelumnya. Sifat-sifat tanah yang mempengaruhi kemampuan tanah menyimpan air, selain tekstur adalah berat volume serta jumlah dan ukuran porinya (Agus *et al.* 2006). Diameter besar

butiran tanah disebut fraksi, banyaknya kelompok besar butir tertentu menunjukkan tekstur. Misalnya tanah yang mempunyai kandungan fraksi dengan besar butir < 0,002 mm sebanyak 80% tergolong mempunyai tekstur klei (Hillel 1982).

Tekstur tanah, biasa juga disebut sebagai besar butir tanah, termasuk salah satu sifat tanah yang berhubungan erat dengan pergerakan air dan zat terlarut, udara, pergerakan panas, berat volume tanah, luas permukaan spesifik (*specific surface*), kemudahan tanah memadat (*compressibility*), dan lain-lain (Hillel 1982). Tabel 1 menunjukkan diameter butir yang menyusun tubuh tanah.

Tabel 1. Klasifikasi tekstur tanah menurut beberapa sistem

ISSS		USDA		USPRA	
Diameter (mm)	Fraksi	Diameter (mm)	Fraksi	Diameter (mm)	Fraksi
> 2	Kerikil	> 0,02	Kerikil	> 2	Kerikil
0,02-2	Pasir	0,05-2	Pasir	0,05-2	Pasir
0,2-2	Kasar	1-2	Sangat kasar	0,25-2	Kasar
0,02-0,2	Halus	0,5-1	Kasar	0,05-0,25	Halus
		0,25-0,5	Sedang		
		0,1-0,25	Halus		
		0,05-0,1	Sangat halus		
0,002-0,02	Debu	0,002-0,05	Debu	0,005-0,05	Debu
< 0,002	Klei (Liat)	< 0,002	Klei (Liat)	< 0,005	Klei (Liat)

Sumber: Hillel (1982) dalam Agus *et al.* (2006)
 Keterangan: International Soil Science Society (ISSS), United States Department of Agriculture (USDA) dan United States Public Roads Administration (USPRA)

Butiran tunggal tanah tersebut bergabung menjadi butiran majemuk yang bentuknya menjadi lebih besar dan disebut sebagai agregat tanah. Agregat yang bergabung menjadi satu membentuk tubuh tanah yang terdiri atas tanah, air, dan udara yang membentuk struktur tertentu. Kemampuan tanah menyerap dan menyimpan (retensi) air dapat diukur dengan menggunakan contoh tanah dengan struktur alami yang kemudian dikenal sebagai contoh tanah dengan struktur tak terganggu (*undisturbed*) yang disimpan di dalam silinder besi yang aman.

Retensi air tanah berhubungan dengan distribusi ukuran pori dan kapiler yang terdapat di dalam tanah. Persentase volume tanah yang tidak ditempati oleh bagian padat tanah disebut porositas tanah. Jumlah seluruh ruang pori yang ada di dalam massa tanah disebut dengan ruang pori total. Pada tanah kering mutlak (dalam oven 105 °C selama > 3 jam), seluruh ruang pori terisi oleh udara, sebaliknya pada tanah jenuh air seluruh ruang pori terisi oleh air, sedangkan pada tanah lembap, sebagian pori terisi udara dan sebagian lagi terisi

oleh air dalam perbandingan tertentu. Tanah lembap yang ideal dan mampu mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman mempunyai kadar air pada kapasitas lapang. Retensi air biasanya ditampilkan dalam bentuk kurva, dikenal dengan kurva pF (logaritma tinggi kolom air). Besarnya pori-pori di dalam tanah dapat dihitung berdasarkan tekanan yang diberikan saat penetapan pF di laboratorium (Tabel 2).

Tabel 2. Hubungan antara ukuran pori tanah dan tekanan yang disetarakan dengan tinggi kolom air serta nilai pF dari masing-masing tinggi kolom air

No	Penampang pori (μ)	Tekanan (atm)	Tinggi kolom air (cm)	pF (log tinggi kolom air)
1	296,0	0,01	10	1,00
2	28,8	0,10	100	2,00
3	8,6	0,33	344	2,54
4	5,8	0,50	516	2,73
5	2,8	1,00	1.033	3,01
6	1,4	2,00	2.066	3,33
7	0,2	15,00	15.495	4,20

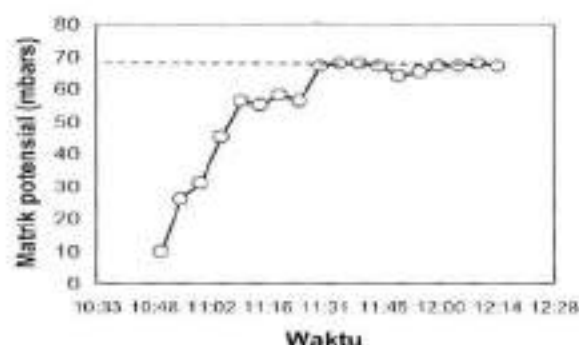
Sumber: Sudirman *et al.* 2006

Ukuran pori tanah mempunyai hubungan dengan kemampuan tanah memegang air tersedia bagi tanaman. Berdasarkan pada keragaman dari penampang pori dan kapiler tanah, maka pori-pori tanah yang berdiameter lebih dari 0,2 mikron disebut pori berguna (Sudirman *et al.* 2006), dan secara umum pori-pori tersebut terbagi atas tiga kelompok:

1. Pori pemegang air, yaitu pori yang berdiameter antara 0,2 dan 8,6 mikron (pF 4,2 - 2,54).
2. Pori drainase lambat, yaitu pori yang berdiameter antara 8,6 dan 28,8 mikron (pF 2,54 - 2,0).
3. Pori drainase cepat, yaitu pori yang berdiameter lebih dari 28,8 mikron (pF 2,0).

Air yang berada dalam pori pemegang air disebut kapasitas air tersedia bagi tanaman (*available water capacity*) yang berada diantara titik layu (pF 4,2) dan kapasitas lapang (pF 2,54). Pada umumnya kapasitas lapang ditetapkan pada tekanan 0,33 atm atau pF 2,54, tetapi kapasitas lapang dapat juga ditetapkan di lapangan dengan menggunakan tensiometer tegangan air atau *internal drainage*. Penetapan kadar air tanah pada kapasitas lapang dengan

menggunakan metode *internal drainage*, memberikan gambaran yang cukup mewakili. Di KP Taman Bogo, kondisi kapasitas lapang dicapai pada matrik potensial ± 68 mBar, dimana pada nilai tersebut tegangan air tanah relatif konstan untuk beberapa kali pengukuran. Nilai matrik potensial tersebut setara dengan tinggi kolom air tanah (*pressure head*) 6900 cm atau kurva pF 3,8. Kadar air ini disebut sebagai kadar air tanah pada kondisi kapasitas lapang.



Gambar 3. Dinamika matrik potensial untuk penetapan kadar air tanah pada kapasitas lapang (Sumber: Haryati *et al.* 2010b)

Pori-pori yang berukuran $< 0,2$ mikron adalah *reservoir* alamiah yang mampu memberikan suplai air bagi perakaran tanaman, dikenal sebagai pori air tersedia. Air yang mengisi pori tersebut merupakan air yang bermanfaat bagi tanaman atau air yang berada pada pF 2,54 – 4,2. *Reservoir* inilah yang harus selalu terisi kembali oleh air baik secara alamiah melalui air hujan maupun melalui irigasi suplemen. Mempertahankan air tersedia bagi tanaman tidak hanya dilakukan pada musim kering tetapi juga harus dilakukan pada musim penghujan ketika tidak ada hujan selama lebih dari 2 minggu. Jika kadar air tersedia jumlahnya makin sedikit, maka tanaman akan mengalami kekeringan yang berujung pada kematian.

Metode Penentuan Jumlah Pasokan Air Irigasi

Jumlah air pada kapasitas lapang lebih banyak dibandingkan dengan kapasitas maksimum tanah memegang air atau disebut kapasitas air tersedia bagi tanaman. Jika jumlah air tersedia sangat sedikit atau habis dimanfaatkan oleh tanaman akan menyebabkan tanaman layu dan berlanjut menjadi layu permanen. Untuk menghindari kejadian tersebut diperlukan penambahan air dari irigasi atau hujan. Pasokan dan penggunaan air bagi pertumbuhan dan

perkembangan tanaman dikenal dengan neraca air. Jika pasokan lebih sedikit dari kebutuhan disebut kekurangan (defisit) dan jika pasokan lebih banyak dari kebutuhan disebut kelebihan (surplus). Terdapat paling tidak 2 cara untuk menentukan jumlah air yang harus ditambahkan ke lahan pertanian, yaitu dengan metode neraca air dan *management allowable depletion* (MAD).

Neraca Air Tanaman

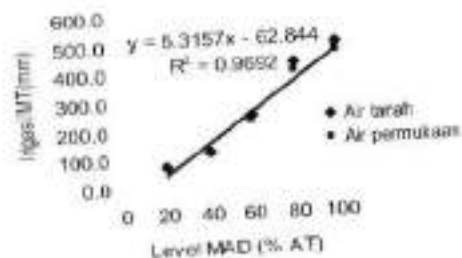
Analisis neraca air tanaman dapat digunakan untuk menghitung kecukupan air untuk memenuhi kebutuhan pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Faktor sifat fisika tanah sangat dominan mempengaruhi jumlah air masuk dan ke luar tubuh tanah, diantaranya adalah infiltrasi, perkolasi, serta jenis dan jumlah pori tanah. Selain itu, jumlah curah hujan dan *cileuncang*, serta evapotranspirasi tanaman yang dibudidayakan. Oleh karena itu, untuk menghitung neraca air harus digunakan hasil analisis sifat fisika tanah. Neraca air harian dapat dihitung dengan rumus dalam Pujilestari 2011:

$$Dr_i = Dr_{i-1} - (P - Ro_i) - I_i - Cr_i + Etc_i + Dp_i$$

- Dr_i : Pengurangan kandungan air tanah hari ke i
- Dr_{i-1} : Pengurangan kandungan air tanah hari ke $i-1$
- P_i : Curah hujan hari ke i
- Ro_i : *Cileuncang* (*Run off*) dari permukaan tanah hari ke i
- I_i : Total irigasi yang terinfiltrasi ke dalam tanah hari ke i
- Cr_i : Efek kapilaritas hari ke i
- Etc_i : Evapotranspirasi tanaman pada hari ke i
- Dp_i : Perkolasi hari ke i

Berdasarkan rumus tersebut dapat dihitung kondisi ketersediaan air tanaman, kelebihan atau kekurangan air serta besarnya volume dan interval irigasi yang dapat diberikan. Analisis neraca air membutuhkan input data yang banyak, baik data yang diperoleh dari penetapan di lapangan atau laboratorium dan hasil perhitungan yang tidak sederhana terutama tentang jumlah *cileuncang*, evapotranspirasi, dan pengamatan curah hujan harian. Skema neraca air pada zone perakaran disajikan pada Gambar 4.

Sumber air irigasi dapat dibedakan sebagai air permukaan dan air tanah. Air permukaan adalah air yang terdapat dan bersumber di/dari permukaan tanah seperti air yang terdapat dalam embung, bendungan, dam, aliran sungai, dan *cileuncang*, sedangkan air tanah adalah air yang terdapat di dalam tanah, sehingga untuk mengeluarkannya biasanya melalui sumur atau dengan menggunakan pompa. Kedua jenis air tersebut yang digunakan dalam menentukan level MAD pada tanah *Typic Kanhapudults* di KP Taman Bogo, tidak berpengaruh terhadap volume irigasi yang diberikan, tetapi volume air dipengaruhi oleh level MAD (Haryati *et al.* 2010). Total volume air irigasi selama pertanaman berbanding lurus dengan level MAD, dengan koefisien determinasi yang tinggi ($R^2 = 0,97$) (Gambar 6). Semakin tinggi level MAD, air yang harus dipertahankan dalam tanah semakin tinggi, sehingga interval irigasi semakin pendek, akibatnya total pemberian air lebih tinggi. Interval pemberian irigasi yaitu 8, 6, 3, 1, dan 1 hari, masing-masing untuk level MAD 20, 40, 60, 80, dan 100% air tersedia (apabila tidak ada hujan). Level MAD 80 dan 100% air tersedia mempunyai interval irigasi yang tidak berbeda (Tabel 3) (Haryati *et al.* 2010a). Apabila ada hujan, angka pada tensiometer dipakai sebagai dasar untuk penyiraman.



Gambar 6. Hubungan level MAD dengan irigasi yang diberikan untuk cabai pada tanah *Typic Kanhapudults* Taman Bogo, Lampung Timur (Sumber: Haryati *et al.* 2010b)

Tabel 3. Irigasi, evapotranspirasi, dan interval irigasi untuk tanaman cabai pada setiap level MAD pada tanah *Typic Kanhapudults*, Tamanbogo

Level MAD (% AT)	Irigasi (mm)	ET _c (mm/hari)	Interval irigasi (hari)
20 (I ₁)	19,2	2,3	8
40 (I ₂)	14,4	2,5	6
60 (I ₃)	9,6	2,9	3
80 (I ₄)	4,8	3,8	1
100 (I ₅)	3,2	4,2	1

Keterangan: Sumber: Haryati *et al.* 2010b. MAD = management allowable depletion, AT = air tersedia, ET_c = evapotranspirasi (dari hasil penelitian sebelumnya)

Prediksi Penurunan Produksi

Pertumbuhan dan perkembangan tanaman mengalami gangguan ringan sampai serius ketika tanaman mengalami cekaman air. Hal ini akan mengakibatkan terjadi penurunan produksi atau hasil yang diharapkan tidak tercapai. Potensi penurunan hasil tersebut dapat diketahui dan perlu diperhitungkan dalam budi daya tanaman agar hasil yang diperoleh tidak mengecewakan. Untuk memprediksi potensi penurunan hasil pada tanaman akibat kekurangan air telah dibuat satu model linier fungsi produksi tanaman yang telah disusun oleh FAO (Doorenbos and Kassam 1979) dengan rumus :

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \times \left(1 - \frac{ETR}{ETM}\right)$$

- Y_a : Produksi tanaman aktual (t/ha)
 Y_m : Produksi tanaman maksimum yang diharapkan
 ETR : Evapotranspirasi tanaman aktual atau ETA (mm/hari)
 ETM : Evapotranspirasi potensial tanaman atau ETc (mm/hari)
 K_y : Faktor respon produksi (-)

K_y adalah faktor yang mendeskripsikan penurunan produksi relatif sehubungan dengan penurunan ETc yang diakibatkan oleh kondisi defisit air. Nilai K_y untuk setiap tanaman berbeda dan bervariasi selama masa pertumbuhannya. Pada umumnya penurunan produksi akibat defisit air selama fase vegetatif dan pemasakan relatif kecil, sementara itu, selama fase pembungaan dan pembentukan hasil nilai K_y lebih besar. Sedangkan ETp adalah penggunaan air konsumtif yang setara dengan evapotranspirasi tanaman. Hasil perhitungan ETp disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perhitungan evapotranspirasi (ETp) tanaman cabai berdasarkan fase pertumbuhannya pada tanah *Typic Kanhapudult* Taman Bogo, Lampung Timur

Fase pertumbuhan	Waktu (hari)	Kc *) (kisaran)		Kc rata2	ET _o ** (mm/hari)	ETp (mm)
		bawah	Atas			
Awal	30	0,30	0,40	0,35	3,29	34,53
Vegetatif-1	30	0,60	0,75	0,68	3,19	64,67
Vegetatif-2	30	0,60	0,75	0,68	3,09	62,60
Pembungaan	10	0,95	1,10	1,03	3,57	36,59
Pembentukan hasil	40	0,85	1,00	0,93	4,37	16,57
Pematangan	7	0,80	0,90	0,85	4,32	25,72
Masa panen	65	0,80	0,90	0,85	4,32	236,84
Jumlah	212					624,52

Keterangan: *) Sumber: Doorenbos and Kassam (1979), **) ET_o pada bulan ybs di Taman Bogo, Lampung Timur

Menurut Doorenbos dan Pruitt (1977), ETP adalah nilai faktor tanaman (K_c) kali evapotranspirasi acuan (ETo). Besarnya ETP cabai selama pertanaman, yang dihitung berdasarkan fase pertumbuhannya adalah 624 mm (Tabel 4), tidak jauh berbeda dengan rata-rata dari perlakuan teknik irigasi. Ini menunjukkan irigasi pada level ini efisien, karena air yang diberikan dipakai semua oleh tanaman.

Efisiensi Penggunaan Air (EPA)

Penggunaan air adalah jumlah air yang digunakan tanaman dalam proses pertumbuhan dan perkembangan untuk memberikan hasil dalam suatu budi daya tanaman pertanian. Penggunaan air oleh tanaman biasanya lebih rendah dibandingkan dengan jumlah air yang diberikan ke dalam tanah. Irigasi suplemen diberikan untuk mengembalikan kadar air yang tersedia di dalam tanah sesuai kapasitasnya, tetapi sebagian air diyakini menguap dari pori drainase cepat sebelum mengisi pori-pori air tersedia. Efisiensi penggunaan air (*water use efficiency* = WUE) adalah hasil tanaman per unit penggunaan air (*water use*).

Sumber Air Irigasi Suplemen pada Lahan Kering

Kualitas air yang digunakan untuk irigasi menentukan produktivitas tanaman. Sumber air permukaan biasanya mengandung unsur hara lebih banyak dibandingkan dengan air tanah, sehingga kualitas air untuk pertanian menjadi lebih baik walaupun kadang-kadang mengandung bahan yang tidak dibutuhkan oleh tanaman. Air permukaan yang ada di KP Taman Bogo mempunyai kualitas lebih baik dibandingkan dengan air tanah (Haryati *et al.* 2010b). Selanjutnya dijelaskan bahwa air permukaan mempunyai kation K, Ca, dan Mg yang lebih tinggi, sehingga jumlah kation lebih tinggi (0,74; air tanah 0,58 me/l air bebas lumpur). Air permukaan juga mengandung lumpur yang cukup tinggi, yaitu 224 mg/l (Tabel 5). Lumpur mengandung sejumlah unsur hara yang diperlukan tanaman (total hara = 11,61 mg/l pada kandungan lumpur 32 mg/l).

Tabel 5. Kualitas air irigasi yang berasal dari air tanah dan air permukaan di KP Taman Bogo

Kation (bebas lumpur)	Air tanah (me/l)	Air Permukaan (me/l)	Anion (bebas lumpur)	Air tanah (me/l)	Air Permukaan (me/l)
NH ₄	0,04	0,04	NO ₃	0,00	0,01
K	0,02	0,04	PO ₄	0,01	0,01
Ca	0,04	0,13	SO ₄	0,04	0,05
Mg	0,03	0,09	Cl	0,15	0,20
Na	0,45	0,29	HCO ₃	0,52	0,36
Fe	0,00	0,05	CO ₃	0,00	0,00
Al	0,00	0,16	Jumlah anion	0,72	0,63
Mn	0,00	0,06	DHL 25 °C dSm	0,058	0,058
Jumlah kation	0,58	0,74	pH	6,0	6,1
			Kadar lumpur (mg/l)	0,00	224

Sumber: Haryati *et al.* 2010b

Efisiensi penggunaan air (WUE) permukaan sebesar 0,25 kg/m³ lebih tinggi jika menggunakan air tanah (Tabel 6). Air permukaan meningkatkan efisiensi penggunaan air, karena air permukaan memberikan hasil tanaman yang lebih tinggi dari pada air tanah. Namun demikian, hasil cabai tersebut masih tergolong rendah dibandingkan dengan rata-rata hasil cabai di daerah penelitian (3-5 t/ha). Hal ini karena kesuburan tanah yang sangat rendah di lokasi penelitian (pH 4,2; C-organik 0,8 %; KTK 4,0 cmol(+)/kg; KB 19,3 %). Pada tanah suboptimal seperti di KP Taman Bogo diperlukan tindakan rehabilitasi untuk memperbaiki sifat-sifat fisika dan kimia tanah, setelah dilakukan pemulihan lahan peningkatan EPA sangat mungkin terjadi.

Tabel 6. Pengaruh sumber air irigasi terhadap efisiensi penggunaan air tanaman cabai pada tanah *Typic Kanhapudults* di Kebun Percobaan Taman Bogo

Sumber air irigasi	Penggunaan Air (WU) (m ³ /ha)	Hasil (kg/ha)	Efisiensi penggunaan air (WUE) (kg/m ³)
Air tanah	6.254,3	1.121,3	0,18
Air permukaan	6.111,0	1.281,2	0,21

Sumber: Haryati *et al.* 2010b

Pengelolaan Air Tersedia

Efisiensi penggunaan air berdasarkan kepada level MAD menjadi penting untuk dipraktikkan karena akan mengurangi pemakaian sumber daya air yang tersedia, paling tidak jumlah air yang diberikan menjadi lebih sedikit tetapi memberikan hasil yang lebih banyak. Dari hasil percobaan di KP Taman Bogo diperoleh hasil bahwa pemberian air pada level MAD 60% air tersedia merupakan pemberian air paling efisien dibandingkan dengan level MAD 20%, 40%, 80%, dan 100% air tersedia (Tabel 7). Hedge (1986 dan 1987) dalam Dalla Costa dan Gianquinto (2002) menyatakan bahwa pada tanah lempung klei berpasir, tanaman cabai memberikan keragaan tanaman berupa berat segar, berat kering, ukuran, dan ketebalan yang terbaik ketika mendapatkan irigasi pada 40 – 60% air tersedia.

Pada level MAD 60% air tersedia, efisiensi penggunaan air mencapai nilai tertinggi dan memberikan tingkat efisiensi penggunaan air yang paling optimum, mampu menghemat penggunaan air dibandingkan dengan level MAD 100% air tersedia (Haryati *et al.* 2010). Penghematan penggunaan air mencapai 2.631,7 m³/ha atau setara dengan 263 mm/musim. Hasil tersebut sejalan dengan hasil penelitian Songsri *et al.* (2009) yang menunjukkan bahwa pada derajat kekeringan air/ketersediaan air yang rendah (1/3 dari kapasitas lapang atau air tersedia), WUE, berat kering akar dan indeks panen tanaman menurun, dan mencapai optimum pada 2/3 (60%) air tersedia.

Tabel 7. Pengaruh level MAD terhadap efisiensi penggunaan air tanaman cabai pada tanah *Typic Kanhapludults* Taman Bogo

Perlakuan	Penggunaan Air (WU)	Hasil Kg/ha	Efisiensi penggunaan air (WUE)
	(m ³ /ha)		(kg/m ³)
20 % air tersedia (I ₁)	4.573,6	901,4	0,20
40 % air tersedia (I ₂)	4.923,7	1.007,1	0,20
60 % air tersedia (I ₃)	5.726,6	1.316,7	0,23
80 % air tersedia (I ₄)	7.564,0	1.341,7	0,18
100 % air tersedia (I ₅)	8.368,3	1.439,3	0,17

Keterangan: MAD = management allowable depletion, WU = water use, WUE = water use efficiency = Hasil/WU (Sumber: Haryati et al. 2010b)

Pemulsaan

Jerami kering dihamparkan menutup permukaan tanah disebut mulsa. Sisa tanaman lain pun dapat dijadikan mulsa. Mulsa yang berasal dari sisa-sisa tanaman disebut mulsa organik, setelah terdekomposisi dapat meningkatkan kandungan bahan organik tanah. Dengan fungsi tersebut mulsa organik selain mampu menurunkan penggunaan air, juga mampu memperbaiki sifat fisika tanah, dan meningkatkan hasil tanaman.

Pada percobaan pemberian mulsa jerami di KP Taman Bogo yang dilakukan oleh Haryati et al. 2010 menunjukkan bahwa dosis mulsa 10 t/ha memberikan hasil buah segar cabai tertinggi (4,60 t/ha) dibandingkan dengan tanpa mulsa dan dosis mulsa 5 t/ha (Tabel 8). Mulsa berkorelasi positif nyata dengan buah segar.

Tabel 8. Pengaruh mulsa terhadap produksi total buah segar cabai pada tanah *Typic Kanhapludults* Taman Bogo, Lampung Timur

Dosis mulsa	Hasil cabai (t/ha)
Tanpa mulsa	3,88
5 t/ha jerami kering	4,24
10 t/ha jerami kering	4,60

Sumber: Haryati et al. 2010a

Teknik irigasi

Teknik irigasi gelontor, tetes, curah, dan bawah permukaan telah diaplikasikan di KP Taman Bogo dalam budi daya cabai oleh Haryati et al. 2010a. Teknik irigasi bawah permukaan memberikan hasil tertinggi dibandingkan dengan teknik lainnya (Tabel 9). Irigasi bawah permukaan dilakukan dengan cara membenamkan pipa-pipa sesuai barisan tanaman di bawah permukaan tanah,

sehingga air irigasi langsung diberikan ke daerah perakaran tanaman pada kedalaman 15 - 25 cm. Tujuan penggunaan teknik ini adalah menekan kehilangan air melalui evaporasi. Teknik irigasi lainnya dengan cara memberikan air irigasi di atas permukaan tanah, sehingga evaporasi dibiarkan terjadi secara alamiah.

Tabel 9. Efisiensi penggunaan air (WUE) tanaman cabai dengan berbagai teknik irigasi pada tanah *Typic Kanhapludults* Taman Bogo, Lampung Timur

Teknik irigasi	Hasil (kg/ha)	WU (m ³ /ha)	WUE (kg/m ³)	WUE (cm/t)
Gelontor	4.476,57	6.160,01	0,73	13,8
Tetes (Drip)	3.731,63	6.257,67	0,60	16,8
Curah (Sprinkler)	3.854,44	6.232,18	0,62	16,2
Bawah permukaan (Sub-surface)	4.890,96	6.235,48	0,78	12,7

Keterangan: WU = water use = penggunaan air oleh tanaman, WUE = water use efficiency. (Sumber: Haryati et al. 2010a)

Teknik irigasi sub-surface memberikan nilai WUE yang paling tinggi dan teknik irigasi drip mempunyai nilai yang paling rendah. Ini sejalan dengan produksi tanaman dimana pada teknik sub-surface hasil tanaman paling tinggi, dan drip paling rendah. Nilai WUE ini sejalan dengan hasil penelitian Beese et al. (1982) yang menunjukkan bahwa WUE tanaman cabai dengan irigasi drip mencapai 12,9 - 17,0 cm/t.

Irigasi curah belum mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air oleh tanaman. Teknik ini sebetulnya diarahkan untuk segera menyebar-ratakan air ke permukaan tanah sesuai dengan jangkauan nozzle yang digunakan. Maksud tersebut dapat segera tercapai dengan membasahi seluruh permukaan tanah dengan cepat, tetapi sebagian air yang diberikan menguap sebelum sampai di permukaan tanah ketika irigasi diberikan pada saat panas terik. Penggunaan *driptape* dalam irigasi tetes mempunyai kendala karena lubangnya tidak sesuai dengan jarak tanam, sehingga tujuan pemberian irigasi di dekat batang tanaman sering tidak tercapai.



Gambar 7. Teknik irigasi sprinkler pada tanaman cabai dengan nozzle berkemampuan radius 5m di KP Taman Bogo (Foto: Sutono 2003)

Irigasi gelontor sebagai teknik irigasi konvensional memberikan efisiensi yang baik jika dilakukan dengan berpedoman kepada kapasitas air tersedia bagi tanaman dan pemberian air dapat segera menyebar rata di permukaan tanah. Sesungguhnya metode gelontor ini lebih dekat ke metode yang lebih konvensional yaitu dengan mengisi seluruh matrik potensial kapasitas tanah memegang air.



Gambar 8. Teknik irigasi gelontor diantara gulud tanaman terung di KP Taman Bogo (Foto: Sutono 2003)

Teknologi Irigasi Suplemen

Irigasi dan konservasi air memegang peranan penting di bidang pertanian. Sekitar 18 % lahan pertanian telah dilengkapi dengan sarana irigasi dan memberikan sumbangan terhadap sepertiga produksi pangan dunia (Stewart and Nielsen 1990). Akan tetapi irigasi dan pengawetan air tidak dapat berdiri sendiri, penggunaannya hanya akan efektif apabila disertai dengan sistem pemupukan berimbang, penggunaan varietas unggul, serta pengendalian hama dan penyakit tanaman. Selain itu, sistem irigasi sangat tergantung kepada penggunaan energi yang lebih tinggi. Dewasa ini sumber energi utama yang digunakan adalah bahan bakar fosil yang tidak dapat diperbaharui. Ini berarti bahwa aplikasi irigasi akan meningkatkan permintaan dan penggunaan bahan bakar.

Irigasi berperan semakin penting pada daerah pertanian yang rawan kekeringan. Sistem irigasi yang diterapkan dewasa ini pada umumnya masih bersifat tradisional, yang meliputi pendistribusian dan penggunaan air, serta masih kurang memperhatikan keseimbangan antara jumlah air yang diberikan dengan kebutuhan air tanaman. Sistem irigasi nonteknis cenderung memboroskan penggunaan air, mengurangi efisiensi penggunaan hara, dan menyebabkan degradasi lahan karena penggenangan terutama apabila sistem irigasi tidak dipadukan dengan drainase (Hillel 1990). Ini berarti bahwa penggunaan irigasi yang tidak tepat bukan saja dapat memboroskan dana, sumber daya air, tenaga, dan waktu tetapi dapat juga merusak sumber daya tanah.

Sistem irigasi moderen dapat dibagi menjadi 5 kategori yaitu irigasi permukaan, irigasi *sprinkle*, irigasi mikro (tetes = *trickle*), irigasi bawah permukaan tanah (*sub-irrigation*), dan irigasi *hybrid* yang merupakan transisi antara dua atau lebih sistem (Kruse *et al.* 1990).

Irigasi Permukaan (Surface Irrigation)

Sistem irigasi seperti ini cocok digunakan pada tanah yang bertekstur halus sampai sedang dengan ketersediaan air dalam volume relatif besar. Untuk tanah bertekstur kasar akan sulit menerapkan sistem ini karena sebagian besar air akan hilang pada saluran. Beberapa model sistem irigasi permukaan antara lain:

a. Penggenangan (*flooding*)

Sistem ini dilakukan pada tanah yang relatif datar. Air dikocorkan pada suatu titik yang relatif tinggi sampai air menggenangi permukaan tanah untuk beberapa waktu. Pada lahan yang cukup luas, akan ada kecenderungan tidak meratanya distribusi air sehingga pengocoran air perlu dilakukan pada berbagai titik melalui parit-parit yang sejajar. Lahan dibagi menjadi beberapa bagian yang lebih kecil yang dibatasi oleh parit-parit, sehingga genangan air melalui parit ini membuat penyebaran air lebih seragam. Untuk lebih

meratakan penyebaran air, dapat dibantu dengan pembuatan parit kecil tambahan menggunakan cangkul atau sekop.

- b. Penggunaan gulud pembatas (*border dike*)
Guludan memotong lereng dibuat pada bagian-bagian ladang yang curam. Air dialirkan pada lereng atas. Untuk mengairi tanaman dengan sistem pertanian menurut strip searah kontur dan jarak tanamnya dalam baris cukup rapat, air dapat menyebar relatif rata.
- c. Sistem guludan (*graded furrow*)
Sistem ini biasanya digunakan untuk tanaman semusim yang ditanam dengan sistem barisan pada guludan seperti jagung dan beberapa jenis tanaman tahunan. Air dialirkan melalui pipa atau dari bagian yang lebih tinggi dari setiap ujung saluran gulud dan akan mengalir melalui saluran gulud. Untuk lahan yang relatif datar, guludan ditata menurut arah lereng supaya air mudah mengalir dari ujung atas sampai ke ujung bawah saluran gulud. Jika lahan berlereng agak curam, guludan dan salurannya dapat dibuat membentuk sudut dengan kontur. Agar air dapat mengalir ke seluruh saluran gulud, aliran harus cukup besar dan kelebihan air pada ujung bawah saluran gulud dapat ditampung dan didistribusikan kembali.
- d. Gulud kecil (*corrugation*)
Salah satu sistem yang menyerupai sistem guludan adalah sistem korugasi (*corrugation*) yaitu sistem gulud yang lebih kecil yang digunakan untuk tanaman yang barisannya rapat. Gulud-gulud kecil ini membantu penyebaran air agar lebih merata dan mengurangi terjadinya erosi karena volume air yang dialirkan relatif lebih rendah.
- e. Sistem tampungan berpematang (*level basin*)
Sistem yang menyerupai sistem petakan sawah dimana areal pertanian dibuat supaya rata dan di sekelilingnya dilengkapi dengan pematang penahan air. Air dalam jumlah yang sudah diperhitungkan sebelumnya dialirkan melalui pipa ke dalam setiap petakan. Pada saat penggenangan dan penyusutan permukaan, air dengan sendirinya akan terdistribusi mengisi pori-pori tanah pada petakan.

Sistem Sprinkle (*Sprinkle Irrigation*)

Pada sistem irigasi seperti ini, air disebarkan ke tanah melalui udara dengan menggunakan sistem tekanan/pompa. Sistem ini merupakan suatu usaha membuat hujan buatan, namun berbeda dengan hujan dimana besar butiran dan keseragaman ditentukan oleh *design sprinkle*. Sistem ini ada yang tetap berada pada suatu tempat (*set system*) sehingga satu sistem mengairi areal yang sama di sekelilingnya. Ada pula sistem yang disebut dengan *mobile system*, dimana sprinkler dapat dipindahkan dengan menggunakan mobil atau dengan tenaga manusia dari satu tempat ke tempat lain.

Irigasi Mikro

Irigasi mikro adalah sistem irigasi seperti *drip/trickle*, irigasi bawah tanah (*subsurface irrigation*) dengan pemberian air melalui pipa-pipa di bawah tanah, *bubbler*, dan sistem *spray* atau semprotan (American Society of Agricultural Engineering (ASEA) 1988).

Sub-Irrigation

Sistem irigasi ini menyediakan air untuk tanaman dengan pengaturan tinggi muka air tanah yang menyebabkan terisinya pori tanah misalnya dengan mengatur tinggi air pada saluran irigasi. Sistem ini berbeda dengan *subsurface irrigation* yang merupakan salah satu bentuk dari *micro irrigation*. Sistem *sub-irrigation* menyebabkan evaporasi meningkat dan akan terjadi pengumpulan garam di permukaan tanah. Oleh karena itu, sistem ini cocok untuk tanah yang rendah kadar garamnya atau untuk tanaman yang toleran terhadap kadar garam tinggi. Adanya lapisan *impermeable* atau muka air tanah alami yang relatif dangkal merupakan persyaratan *sub-irrigation* supaya kehilangan air melalui perkolasi tidak terlalu besar. *Sub-irrigation system* biasanya dikombinasikan dengan sistem drainase dan dengan perpaduan ini biaya akan dapat ditekan.

Teknik Panen Air Hujan

Berbagai teknik telah dicoba guna menampung air hujan untuk disimpan di dalam zone perakaran atau ditampung sementara sebagai air permukaan dan didistribusikan pada musim kemarau. Pada daerah arid dan semi arid banyak dipraktekkan teknik modifikasi *micro relief* seperti pematang setengah lingkaran (*half moon dykes*), lorak (*dead-end trenches* atau *sediment pits*), sistem gulud menurut kontur, sistem gulud berblok (*tied ridging* atau *boxed ridges*), pengolahan tanah berzone (*zoned tillage*), dan embung atau kedung (Irawan 1999; Purnomo 1997).

Menurut Purnomo (1997) embung bisa dibangun oleh petani baik secara individu atau berkelompok, tergantung keperluan dan luas areal tanaman yang akan diirigasi. Untuk keperluan individu dengan luas tanaman (palawija) 0,5 ha, misalnya, embung yang diperlukan adalah panjang 10 m, lebar 5 m, dan kedalaman 2,5 m - 3 m.

Wiyo *et al.* (2000) dari hasil penelitian di Malawi mengemukakan bahwa *tied ridging* memberikan manfaat untuk tanaman jagung apabila curah hujan berkisar antara 500 sampai 900 mm/tahun. Apabila curah hujan tahunan <500 mm, jumlah air tidak cukup untuk mendukung pertumbuhan tanaman jagung, tetapi pada daerah dengan curah hujan tahunan > 900 mm, *tied ridging* tidak memberikan pengaruh yang berarti karena curah hujan cukup untuk pertumbuhan tanaman. Namun untuk meningkatkan indeks pertanian, *tied ridging* dapat dibuat pada akhir musim hujan sehingga meningkatkan cadangan

air tanah untuk musim kemarau. Pada umumnya *tied ridging* memberikan manfaat apabila curah hujan berada di bawah normal dan tanah bertekstur halus.

Berbagai teknik pemanenan air hujan dapat ditawarkan kepada petani dengan terlebih dahulu memberikan pengertian tentang manfaat dan resiko (termasuk resiko biaya) penggunaan masing-masing alternatif. Apabila berbagai pilihan telah dipahami petani, maka merekalah yang akan menentukan intervensi yang ingin diterapkan pada lahan mereka (Agus 1999).

Penutup

Lahan kering mempunyai potensi untuk dijadikan tempat budi daya tanaman pangan sepanjang tahun apabila ketersediaan untuk penyiraman tidak tergantung kepada curah hujan.

Air permukaan baik yang terdapat di sungai, dam, atau embung berpotensi untuk mengatasi masalah kekurangan air pada musim kemarau, periode kering di musim hujan, dan pada tahun-tahun El Nifio. Selain untuk mengatasi kekurangan air, air permukaan mempunyai kandungan hara yang dapat meningkatkan kesuburan tanah. Untuk memanfaatkan air permukaan yang letaknya jauh dari lokasi budi daya tanaman pangan dapat digunakan teknologi irigasi dengan menggunakan pompa yang dipadukan dengan teknologi distribusi air, baik secara konvensional dengan saluran terbuka, maupun cara moderen seperti irigasi tetes, sprinkler dan bawah permukaan yang lebih efisien.

Untuk memilih teknik irigasi yang akan diterapkan hendaknya berpedoman kepada kemampuannya mengoptimalkan penggunaan air. Penggunaan air yang efisien ditandai oleh tingginya ratio hasil tanaman untuk setiap unit volume air irigasi yang digunakan. Teknik irigasi input tinggi tidak selalu memberikan efisiensi tinggi, teknik konvensional pun dapat memberikan efisiensi tinggi jika dijalankan dengan baik.

Ketika kemampuan dalam menampung kelebihan air dan kemudian mendistribusikannya secara efisien, maka potensi penurunan hasil tanaman karena jumlah curah hujan berkurang akibat adanya perubahan iklim, akan dapat ditanggulangi dengan baik.

Daftar Pustaka

- Agus, F. 1999. Selection Procedures Of Soil Conservation Measures In Indonesian Regreening Program. Paper presented at the 10th International Soil Conservation Organization Conference, 23 - 28 May 1999, West Lafayette, Indiana USA. (Unpublished).
- Agus, F., R.D. Yustika, dan U. Haryati 2006. Penetapan berat volume tanah. Hal. 25 - 34 dalam Kurnia, U., F. Agus, A. Adimihardja, dan A. Dariah (Eds.). Sifat Fisik Tanah dan Metode Analisisnya. Balai Besar Sumber Daya Lahan Pertanian. Bogor.
- Agus, F., Yusriat, dan S. Sutono 2006. Penetapan tekstur tanah. Hal. 43 - 62 dalam Kurnia, U., F. Agus, A. Adimihardja, dan A. Dariah (Eds.). Sifat Fisik Tanah dan Metode Analisisnya. Balai Besar Sumber Daya Lahan Pertanian. Bogor.
- Allen, R. G, L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome.
- American Society of Agricultural Engineering (ASEA). 1988. Design and installation of micro irrigation systems. In Standards EP405, ASEA, St. Joseph, MI. P.536-539.
- Balai Penelitian Tanah 2005. Inventarisasi dan Penelitian Pengelolaan Tanah. Laporan Tahunan 2004. Puslitbangtanak. Bogor.
- Beese, F., R. Hort, and P.J. Wierenga 1982. Growth and yield respon of chile pepper to trickle irrigation. *Agronomy Journal* 74:556 - 561.
- Dalla Costa, L. and G. Gianquinto. 2002. Water stress and watertable depth influence yield, water use efficiency, and nitrogen recovery in bell pepper: lysimeter studies. *Aust. J. Agric. Res.* 53: 201 - 210.
- Doorenbos, J. and A.H. Kassam 1979. Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. FAO, Rome.
- Doorenbos, J. and W. O. Pruitt 1977. Guideline for Predicting Crop Water Requirement. FAO Irrigation and Drainage Paper. Vol. 24. Rome.
- Haryati, U., A. Abdurachman, dan K. Subagyo. 2010a. Efisiensi penggunaan air berbagai teknik irigasi untuk pertanaman cabai di lahan kering pada Typic Kanhapludults Lampung. Hal. 23-45 dalam Kartiwa et al. (Eds.). Pros. Sem. Nas. Sumber daya Lahan Pertanian. Bogor, 30 Nov - 1 Des 2010. BBSOLP. Bogor.

- Haryati, U., N. Sinukaban, K. Murti Laksono, dan A. Abdurachman. 2010b. Management Allowable Depletion (MAD) Level untuk Efisiensi Penggunaan Air Tanaman Cabai pada Tanah Typic Kanhapludults Tamanbogo. P 11 – 15 JTJ 3/2010.
- Hillel, D. 1982. Introduction to Soil Physics. Academic Press., Inc. San Diego, California.
- Hillel, D. 1990. Role of irrigation in agricultural systems. pp. 5-30 in B.A. Stewart and D.R. Nielsen (Eds.). Irrigation of Agricultural Crops. Agronomy 30. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- http://www.bps.go.id/tnmn_pqn.php?kat=3&id
- <http://www.litbang.deptan.go.id>
- Irawan, B. Hafif, dan Suwardjo. 1999. Prospek pengembangan kedung (embung mikro) dalam peningkatan produksi pangan dan pendapatan petani: Studi kasus di Desa Selopamiro, Bantul, Yogyakarta. Hal. 21-38 dalam Prosiding Seminar Nasional Sumber daya Lahan, Bogor 9-11 Feb. 1999. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- James, L.G. 1988. Principle of Farm Irrigation System Design. John Wiley & Sons. Inc. New York.
- Kruse, E.G., D.A. Bucks, and R.D. von Bernuth. 1990. Comparison of irrigation systems. Pp. 475-508 in B.A. Stewart and D.R. Nielsen (Eds.) Irrigation of Agricultural Crops. Agronomy 30. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Ilen, R.G. L.S. Pereira., D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and drainage paper. 301p.
- Oldeman, L.R., S.N. Darwis, dan I. Las. 1975. Agroclimatic map of Sumatera, Kalimantan, Maluku and Irian Jaya. Contribution of the Central Research Institute. Bogor.
- Pawitan, H. 1998. Antisipasi Bencana Banjir dan Kekeringan serta Upaya Penanggulangannya. Makalah disajikan pada diskusi panen. Jakarta 12 Agustus 1998. Peragi. (Tidak dipublikasikan).
- Pujilestari, N, N. Heryani dan Y. Sarvina 2011. Aplikasi program neraca air dengan sistem "warm" dalam penentuan potensi masa tanam di Kab. Pacitan Jawa Timur. Buku II: 481 – 492 dalam Pros. Semnas Sumber Daya Lahan Pertanian. Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian. Banjarbaru 13 – 14 Juli 2011.

- Purnomo, E. 1997. Embung kolam penampung air. www.pustaka.litbang.go.id.
- Rahman, A. 2011. Hubungan bilateral bidang pertanian antara Amerika Serikat dan Indonesia. Buku I: 21 – 34 dalam Pros. Semnas Sumber Daya Lahan Pertanian. Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan pertanian. Banjarbaru 13 – 14 Juli 2011.
- Songsri, P., S. Jogloy, C.C. Holbrook, T. Kesmala, N. Vorasoot, Akkasaeng, and A. Patanothai. 2009. Association of root, specific leaf area and SPAD chlorophyll meter reading to water use efficiency of Peanut under different available soil water. Agricultural Water Management 96: 790 – 798. Elsevier. B. V.
- Stewart, B.A. and D.R. Nielsen 1990. Scope and objective of monograph. Pp. 1-4 in B.A. Stewart and D.R. Nielsen (Eds.) Irrigation of Agricultural Crops. Agronomy 30. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Sudarman, K., B. Kertiwa, dan W. Trinugroho 2011. Potensi dan desain optimalisasi sumber daya air untuk pengembangan pertanian lahan kering beriklim kering di Desa Persiapan Puncak Jering, Kec. Suela, Kab. Lombok Timur, Prov. Nusa Tenggara Barat. Buku II: 37 – 50 Pros. Semnas Sumber daya Lahan Pertanian. Balai Besar Litbang Sumber daya Lahan Pertanian. Banjarbaru 13 – 14 Juli 2011.
- Sudirman, S. Sutono, dan I. Juarsah 2006. Penetapan retensi air tanah di laboratorium. Hal. 167 – 176 dalam Kurnia, U., F. Agus, A. Adimihardja, dan A. Dariah (Eds.). Sifat Fisik Tanah dan Metode Analisisnya. Balai Besar Sumber Daya Lahan Pertanian. Bogor.
- Surmaini, E dan Y. Sugianto 1999. El Nino dan kesinambungan pengembangan beras. Buku III: 519 – 533 dalam Pros. Sem. Nas. Sumber Daya Lahan. Cisarua – Bogor 9-11 Februari 2011.
- Sutonono, S., S. Wiganda, I. Isyafudin, dan F. Agus 2001. Pengelolaan Sumber Daya Air dengan Teknologi Input Tinggi. Laporan Akhir Tahun Anggaran 2001. Bagian Proyek Penelitian Sumber daya Lahan dan Agroklimat dan Proyek Pengkajian Teknologi Pertanian Partisipatif. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian. (Tidak dipublikasikan).
- Tata'ohu, S.H., S. Sutono, dan Y. Soelaeman 2003. Peningkatan produktivitas lahan kering masam melalui penerapan teknologi konservasi tanah dan air. Hal. 45 – 63 dalam Prosiding Simposium Nasional Penggunaan Tanah Masam. Bandar Lampung, 29 – 30 September 2003. Pusat

Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian. Bogor.

Withers, B. and S. Vipond 1974. *Irrigation: Design and Practice*. Bastford Academic and Educational Limited. London. Pp. 73-74.

Wiyono, K.A., Z.M. Kasumekera, and J. Feyen 2000. Effect of tied ridging on soil water status of maize crop under Malawi conditions. *Agricultural Water Management* 45:101-125.

10. VALUASI EKONOMI APLIKASI TEKNIK KONSERVASI TANAH

Irawan dan Neneng L. Nurida

Peneliti Balitbangtan di Balai Penelitian Tanah

Pendahuluan

Konservasi tanah merupakan isu sosial-ekonomi-lingkungan yang penting karena terkait dengan fungsi lahan pertanian dalam penyediaan lapangan kerja, hasil-hasil pertanian dan sekaligus jasa lingkungan. Kehilangan lapisan atas tanah (*top soil*) sangat berpengaruh terhadap kesuburan dan produktivitas tanah. Pada tingkat penggunaan sarana produksi pertanian, seperti pupuk yang tetap atau sama setiap musim tanam, kejadian erosi pada lahan pertanian akan menurunkan produksi pangan dan serat (Napier dan Carter 2000). Di sisi lain, erosi tanah dapat menimbulkan kerusakan di luar wilayah pertanian (*off-site damage*), seperti pencemaran air, pendangkalan waduk, dan kerusakan sarana dan prasarana jaringan irigasi dan jalan.

Aplikasi teknik konservasi tanah pada lahan pertanian dapat juga dipandang sebagai penyedia lapangan kerja, di satu sisi dan sebagai pemborosan tenaga kerja, di sisi lain karena hilangnya kesempatan petani untuk mengerjakan aktivitas ekonomi lain yang mungkin sekali dalam jangka pendek akan memberikan penghasilan tunai, berupa upah kerja. Penerapan teknik konservasi tanah yang memerlukan biaya investasi dan pemeliharaan tidak serta merta akan meningkatkan produktivitas tanah, sehingga menurut pertimbangan petani kegiatan penerapan teknik konservasi tanah pada lahan pertanian hanya dipandang sebagai "membuang" biaya dan waktu saja.

Yakin (1997) menyatakan bahwa pemanfaatan dan pengelolaan lahan untuk kepentingan ekonomi seharusnya dilakukan tanpa merusak lingkungan, atau diupayakan pada kondisi keseimbangan antara kedua komponen tersebut mendekati keadaan ideal. Pengelolaan lahan yang ideal dicirikan oleh terpenuhinya aspek ekonomi dan terjaganya fungsi ekologi lahan. Keseimbangan ekonomi dan ekologi dalam pengelolaan lahan dapat dicapai dengan menerapkan aspek ekonomi sebagai instrumen yang mengatur alokasi sumber daya lahan secara rasional (Steer 1996). Efisiensi, efektivitas, dan berkelanjutan pengelolaan lahan akan diketahui jika output pengelolaan lahan tersebut, baik produksi barang dan jasa maupun jasa lingkungan yang dihasilkan dapat dinilai dalam satuan moneter. Apabila hal tersebut dapat dilakukan maka suatu kebijakan untuk mengurangi dampak negatif atau meningkatkan dampak positif terhadap lingkungan akan dapat dirumuskan (Serafi 1997).

Tindakan menilai atau menghitung manfaat lingkungan dan dampaknya kepada masyarakat secara ekonomi tidak dapat dilakukan dengan sekedar

menyatakan secara relatif bahwa nilainya sangat kecil atau sangat besar. Penilaian manfaat barang dan jasa lingkungan harus dinilai secara finansial (Barbier 1995). Masalah yang muncul dalam pengelolaan lahan pertanian, terutama lahan kering berlereng dengan penerapan kaidah konservasi tanah adalah adanya output lingkungan yang tidak mempunyai nilai pasar langsung atau belum dinyatakan secara jelas seberapa besar nilai ekonominya. Kondisi ini disebut eksternalitas, sebab manfaat pengelolaan lahan kering yang menerapkan teknik konservasi tanah akan mempunyai dampak terhadap aspek-aspek kehidupan yang berada di luar sistem usaha tani lahan kering tersebut.

Bab ini menyajikan beberapa metode atau pendekatan valuasi ekonomi dan nilai manfaat lingkungan penerapan teknik konservasi tanah pada lahan kering. Di dalam artikel ini penulisan istilah konservasi tanah termasuk juga di dalamnya konservasi air karena kedua hal itu pada dasarnya tidak dapat dipisahkan.

Valuasi Ekonomi

Definisi dan Manfaat Valuasi Ekonomi

Valuasi terkait dengan aspek nilai yang bersifat subjektif. Sesuatu yang semula bersifat subjektif akan menjadi objektif apabila melibatkan banyak orang atau bahkan semua orang dalam suatu komunitas. Nilai merupakan persepsi seseorang terhadap suatu obyek pada tempat dan waktu tertentu. Persepsi merupakan pandangan individu atau kelompok orang terhadap suatu obyek sesuai dengan tingkat pengetahuan, pemahaman, harapan, dan norma. Oleh karena itu, nilai sumber daya lahan pertanian bisa beragam tergantung dari persepsi masing-masing orang.

Terkait dengan sumber daya lahan, valuasi ekonomi merupakan penilaian secara kuantitatif terhadap barang dan atau jasa yang dihasilkan oleh satu hamparan lahan atas dasar nilai pasar (*market value*) atau nilai non-pasar (*non market value*). Valuasi ekonomi merupakan alat ekonomi (*economic tool*) yang menggunakan teknik penilaian tertentu untuk mengestimasi nilai moneter barang dan atau jasa (Othman *et al.* 2004, Rachmansyah 2010). Valuasi ekonomi berbeda dengan evaluasi ekonomi. Evaluasi ekonomi membandingkan hasil kinerja yang sudah dicapai (hasil) dengan targetnya (rencana) berdasarkan tolok ukur ekonomi atau finansial.

Valuasi ekonomi juga berbeda dengan appraisal ekonomi (*economic appraisal* atau *economic assessment*) dimana yang disebut terakhir berkaitan dengan penilaian rencana investasi pada suatu kegiatan ekonomi atau studi kelayakan investasi. Pada umumnya studi kelayakan investasi menilai biaya dan manfaat barang dan/atau jasa yang bersifat nyata (*tangible*) dan ada pasarnya (*marketable goods*), baik dengan harga pasar atau harga bayangan (*shadow*

price). Appraisal ekonomi digunakan untuk menentukan nilai atau manfaat dan kelayakan investasi berdasarkan kriteria pengambilan keputusan tertentu (Gittinger 1982).

Valuasi ekonomi menggunakan satuan moneter sebagai patokan perhitungan yang dianggap sesuai. Walaupun masih terdapat keragu-raguan bahwa nilai uang belum tentu absah untuk beberapa atau semua hal, seperti nilai jiwa manusia, tetapi pada kenyataannya pilihan harus diputuskan dalam konteks kelangkaan sumber daya. Oleh karena itu, satuan moneter sebagai patokan pengukuran merupakan ukuran kepuasan untuk suatu tindakan pengambilan keputusan. Ketidak-hadiran pasar tidak berarti manfaat ekonomi suatu barang atau jasa tidak ada, oleh karena itu preferensi yang berkaitan dengan peningkatan kesejahteraan masyarakat itu mau tidak mau harus menggunakan satuan moneter. Ketidak-hadiran pasar memang akan membuat proses valuasi ekonomi sumber daya lahan menjadi lebih rumit, atau harus dilakukan melalui beberapa tahap.

Ada beberapa alasan mengapa satuan moneter diperlukan dalam valuasi ekonomi sumber daya lahan. Analog dari pendapat Suparmoko dan Suparmoko (2000) tiga alasan utamanya adalah: (1) satuan moneter dapat digunakan untuk menilai tingkat kepedulian seseorang, termasuk petani atau pengambil kebijakan terhadap lahan pertanian; (2) satuan moneter dari manfaat dan biaya pengelolaan lahan dapat menjadi pendukung untuk keberpihakan terhadap kualitas lahan dan lingkungan; dan (3) satuan moneter dapat dijadikan sebagai bahan pembandingan secara kuantitatif terhadap beberapa pilihan dalam memutuskan suatu kebijakan tertentu termasuk pemanfaatan lahan pertanian.

Alasan pertama dapat diartikan sebagai moneterisasi keinginan atau kesediaan seseorang untuk membayar bagi kepentingan lingkungan. Perhitungan ini secara langsung mengekspresikan fakta tentang preferensi lingkungan dari seseorang atau masyarakat. Hal sebaliknya juga pada seseorang atau masyarakat yang merasa kehilangan manfaat lingkungan, maka permasalahannya dapat disebut sebagai keinginan untuk menerima kompensasi kerugian yang diderita. Oleh karena itu, berdasarkan alasan pertama tersebut satuan moneter dapat menunjukkan kepedulian yang kuat seseorang atau masyarakat terhadap lahan pertanian dan lingkungannya.

Alasan kedua berkaitan dengan masalah kelangkaan sumber daya lahan. Apabila ada hamparan lahan pertanian yang menghadapi masalah kelangkaan atau "penciutan" akibat konversi untuk pembangunan, akan dinilai tinggi yang terekspresikan dalam satuan moneter. Kemudian alasan ketiga berkaitan dengan aspek pengambilan keputusan dalam pemanfaatan lahan pertanian, dimana satuan moneter dapat digunakan sebagai salah satu indikator pengambilan keputusan.

Pemahaman tentang konsep valuasi ekonomi memungkinkan para petani dan pengambil kebijakan dapat menentukan pengelolaan lahan pertanian yang

efektif dan efisien, bukan hanya untuk tujuan jangka pendek tetapi juga jangka panjang. Hal tersebut karena valuasi ekonomi sumber daya lahan dapat digunakan untuk menunjukkan keterkaitan antara konservasi sumber daya lahan dan pembangunan ekonomi, sehingga dengan demikian valuasi ekonomi dapat menjadi suatu alat penting dalam upaya peningkatan apresiasi dan kesadaran masyarakat terhadap kelestarian manfaat dan fungsi lahan pertanian baik bagi petani maupun masyarakat secara umum.

Metode Valuasi Ekonomi

Metode valuasi ekonomi sumber daya lahan sebagaimana disarikan oleh PSLH-UGM (2001) dibagi ke dalam dua pendekatan, yakni valuasi yang menggunakan fungsi permintaan dan valuasi yang tidak menggunakan fungsi permintaan. Valuasi ekonomi dengan pendekatan fungsi permintaan meliputi empat metode, yakni metode dampak produksi, metode respon dosis, metode pengeluaran preventif, dan metode biaya pengganti. Valuasi ekonomi yang tidak menggunakan fungsi permintaan meliputi metode valuasi kontingensi, metode biaya perjalanan, metode nilai properti, dan metode biaya pengobatan.

Ada tiga metode valuasi ekonomi yang erat kaitannya dengan nilai manfaat penerapan teknik konservasi tanah pada lahan pertanian, yakni metode pengeluaran preventif, metode biaya pengganti, dan valuasi kontingensi. Secara ringkas penjelasan ketiga metode tersebut diuraikan.

Metode Pengeluaran Preventif

Metode ini sering disebut dalam beberapa istilah, selain pengeluaran preventif (*preventive cost method*) juga dikenal dengan pengeluaran pencegahan, pengeluaran mitigasi, pengeluaran untuk bertahan, biaya pemeliharaan, atau biaya kerusakan yang dihindari. Semua istilah tersebut mempunyai arti yang kurang lebih sama, yaitu biaya atau pengeluaran untuk menghindari dampak atau hilangnya manfaat akibat dari kerusakan lingkungan.

Sebagai ilustrasi pada tingkat petani (*on-site*) nilai penerapan teknik konservasi tanah dihitung dari biaya yang dikeluarkan oleh petani atau komunitas petani untuk mencegah terjadinya kerusakan lahan dan lingkungan, seperti pembuatan terasering untuk mengendalikan erosi dan aliran permukaan pada lahan kering (skala usaha tani) atau wilayah hulu daerah aliran sungai (skala sub DAS). Kemudian pada sisi masyarakat wilayah hilir DAS (*off-site*) adalah berupa biaya yang dikeluarkan untuk pencegahan terjadinya banjir, baik berupa pembuatan dam maupun pengerukan sungai.

Beberapa hasil penelitian telah menghitung biaya yang dibutuhkan untuk menerapkan teknik KTA pada usaha tani lahan kering sebagaimana dirangkum oleh Haryati *et al.* 1995. Investasi yang diperlukan untuk aplikasi teknik KTA

berupa teras bangku memerlukan tenaga kerja sekitar 495-662 hari orang kerja (HOK) /ha, teras kredit 245 HOK /ha, teras gulud 227 HOK /ha, dan pertanaman lorong (*alley cropping*) 116 HOK /ha. Secara nominal biaya investasi tersebut tergantung pada upah tenaga kerja setempat. Selain biaya untuk upah, investasi aplikasi teknik KTA juga memerlukan biaya bahan dan peralatan. Hasil penelitian Irawan (2007) berdasarkan survei di DAS Citirik, Jawa Barat menunjukkan bahwa biaya investasi penerapan teknik KTA pada lahan kering berbasis tanaman pangan mencapai Rp 5,2 juta /ha (teras bangku), Rp 4,2 juta /ha (teras gulud), dan Rp 3,6 juta /ha (vegetatif: strip rumput). Biaya investasi tersebut mencakup untuk upah tenaga kerja (80-90%) dan alat/bahan (10-20%) tergantung teknik KTA yang diterapkan (mekanik atau vegetatif). Pengeluaran preventif tersebut diperlukan untuk mencegah laju erosi pada lahan usaha tani melebihi batas ambang yang diperbolehkan.

Metode Biaya Pengganti

Pada prinsipnya metode biaya pengganti (*replacement cost method*) serupa dengan metode biaya preventif tetapi biaya tersebut dikeluarkan setelah degradasi lingkungan terjadi dengan tujuan untuk mengembalikan kualitas lingkungan pada kondisi awal. Pada banyak kasus, metode biaya pengganti mempunyai kegunaan yang sama dengan pendekatan produktivitas dan variasi lain dari metode ini adalah metode biaya relokasi.

Penerapan metode biaya pengganti sederhana untuk kasus kerusakan atau kehilangan fisik, seperti jembatan atau penggunaan lahan tertentu. Sebagai ilustrasi yang umum digunakan adalah konservasi hutan bakau di suatu pesisir. Manfaat keberadaan hutan bakau seakan tidak bermakna, tetapi manakala hutan bakau tersebut akan dikonversi atau dikurangi, bahkan dihilangkan maka akan diketahui beberapa nilai manfaatnya yang akan hilang atau kerugian yang harus ditanggung masyarakat. Kerugian yang dimaksud misalnya abrasi pantai atau kerusakan lahan pertanian dan permukiman di sekitarnya akibat gelombang air pasang. Salah satu cara untuk meniadakan dampak yang terjadi tersebut adalah dengan membuat dinding pemecah ombak sedemikian rupa ukuran panjang, tinggi, dan tebalnya sehingga dapat menggantikan fungsi hutan bakau dalam mengendalikan ombak dan gelombang air pasang. Biaya yang diperlukan untuk membuat dinding pemecah ombak itulah sebagai biaya pengganti manfaat hutan bakau terhadap bahaya abrasi pantai dan banjir akibat air pasang, namun sesungguhnya fungsi hutan bakau tersebut bukan hanya itu. Pada ilustrasi tersebut dengan mudah dapat dimengerti bahwa akan terjadi perubahan keseimbangan rantai makanan, siklus air dan hara dalam ekosistem perairan pantai yang dipengaruhi oleh perubahan ekosistem hutan bakau. Dengan demikian pengurangan luas atau bahkan pemusnahan hutan bakau bukan hanya akan berdampak terhadap abrasi pantai dan banjir akibat ombak/gelombang air

laut tetapi juga berdampak terhadap penurunan populasi ikan yang menjadi sumber penghidupan masyarakat sekitar. Nilai kerugian tersebut secara moneter merupakan besaran biaya pengganti yang harus dikeluarkan jika kebijakan pengelolaan hutan bakau tersebut dilaksanakan.

Terkait dengan aplikasi teknik KTA pada lahan pertanian, valuasi ekonomi dengan metode ini didasarkan pada biaya yang harus dikeluarkan untuk mengembalikan tingkat kesuburan tanah akibat erosi yang menyebabkan kehilangan lapisan atas tanah (*top soil*) bersama unsur haranya. Metode ini antara lain digunakan oleh Melisa (2010) pada kawasan hutan lindung Wosi-Rendani, Manokwari, Papua Barat dan Sutrisno (2012) pada wilayah Sub DAS Keduang, Wonogiri.

Metode Valuasi Kontingensi

Metode valuasi kotingensi atau *contingency valuation method* (CVM) dapat diterapkan untuk menilai manfaat penerapan teknik konservasi tanah dan air pada lahan pertanian. Teknik penerapan metode ini melalui survei dengan cara mewawancarai responden yang terkait langsung dengan pemanfaatan sumber daya lahan tersebut. Ada dua pendekatan CVM dikaitkan dengan pihak responden, yakni: (1) kemauan untuk menerima atau *willingness to accept* (WTA) dan (2) kemauan untuk membayar atau *willingness to pay* (WTP). Responden pendekatan yang pertama adalah para petani, yakni komunitas di wilayah hulu DAS sebagai pihak yang diminta untuk menerapkan teknik KTA pada lahan pertanian, sedangkan responden pendekatan yang kedua adalah masyarakat hilir DAS yang terkena dampak atau pihak penerima manfaat sistem pertanian di wilayah hulunya.

Pendekatan WTA digunakan untuk mengetahui seberapa besar petani mau dibayar agar bersedia menerapkan dan memelihara teknik KTA pada lahan keringnya sehingga erosi tanah dan aliran permukaan (*run off*) tidak terjadi atau dapat diminimalisir. Penerapan teknik KTA merupakan hal yang baik bagi petani, karena dengan melalui KTA lahannya akan terlindungi dari bahaya erosi dan aliran permukaan, sehingga kesuburan tanahnya dapat dipertahankan atau bahkan ditingkatkan. Penerapan teknik KTA pada lahan kering memerlukan biaya investasi dan pemeliharaan yang tidak serta merta biaya tersebut dapat kembali dari hasil usaha taninya. Hal itu seperti dilaporkan oleh Liao dan Wu (1987) bahwa dalam jangka pendek hasil tanaman pangan pada usaha tani lahan kering berlereng dengan penerapan teras bangku lebih rendah daripada hasil tanaman pangan pada usaha tani lahan kering berlereng tanpa teknik konservasi tanah. Hal tersebut disebabkan oleh adanya pemindahan *top soil* ketika pembuatan teras dan berkurangnya areal pertanaman.

Manfaat penerapan teknik KTA pada lahan pertanian bukan hanya dirasakan oleh petani tetapi juga oleh masyarakat luas yang berada di wilayah

hilir suatu daerah aliran sungai. Apabila erosi tanah dan aliran permukaan di wilayah pertanian lahan kering miring dapat dikendalikan atau diminimalisir, maka bahaya banjir dan pendangkalan sungai di wilayah hilir dapat ditekan. Berdasarkan hal tersebut, maka pendekatan WTP untuk menilai manfaat penerapan teknik KTA dapat dilakukan. Pendekatan WTP digunakan untuk mengetahui seberapa besar masyarakat wilayah hilir DAS mau membayar jasa lingkungan yang dalam hal ini terkait dengan manfaat penerapan teknik KTA pada lahan pertanian yang mampu mengurangi bahaya banjir.

Pendekatan WTA/WTP tersebut memerlukan suatu kondisi dimana masyarakat, baik para petani (komunitas hulu) maupun masyarakat luas (komunitas hilir) mempunyai pengetahuan yang cukup mengenai hubungan antara pengelolaan sumber daya lahan (wilayah hulu) dengan kualitas lingkungan di wilayah hilir. Salah satu indikator kualitas lingkungan wilayah hilir adalah kejadian banjir, baik besaran maupun frekuensinya yang berdampak terhadap kehidupan masyarakat setempat. Sebagai contoh kerugian yang harus diderita oleh masyarakat wilayah rawan banjir di Bandung Selatan pada periode tahun 2000-2005, sebanyak rata-rata 23.551 kepala keluarga (KK) per tahun mencapai Rp 244.000 /KK /tahun (Irawan 2007). Bentuk kerugian tersebut berupa biaya perbaikan rumah, peralatan elektronik, perlengkapan rumah tangga, serta kehilangan harta benda akibat terkena banjir. Secara logika masyarakat tersebut akan bersedia mengeluarkan uang maksimal sebesar Rp 244.000 /KK /tahun apabila ada jaminan kejadian dan dampak banjir tidak akan terjadi lagi. Dikaitkan dengan konsep WTP untuk penerapan teknik KTA pada lahan pertanian, maka besaran WTP masyarakat tersebut akan sangat tergantung pada pengetahuan dan keyakinan mereka terhadap efektivitas penerapan teknik KTA pada lahan pertanian (wilayah hulu) terhadap pengendalian banjir (wilayah hilir). Banyak faktor yang berpengaruh terhadap besaran WTP tersebut, antara lain tingkat pendapatan, tingkat pendidikan, sumber mata pencaharian, jarak permukiman atau rumah tempat tinggal terhadap sungai, dan implementasi kebijakan yang diperlukan. Masyarakat hilir perlu jaminan mengenai implementasi kebijakan pemerintah bahwa apabila mereka mengeluarkan dana, berupa WTP tersebut maka para petani akan menerapkan teknik KTA pada lahan pertaniannya. Studi yang relevan dengan pendekatan CVM dilakukan juga oleh NRMP (*Natural Resources Management Project*) di Kalimantan yang menginformasikan bahwa masyarakat sekitar Taman Nasional Bukit Baka-Bukit Raya bersedia membayar (WTP) sebesar Rp 11.500 /KK /tahun untuk mempertahankan keberadaan Taman Nasional yang dimaksud (NRMP 1996). Kesediaan masyarakat untuk membayar tersebut tidak terlepas dari adanya manfaat jasa lingkungan taman nasional bagi mereka, antara lain sebagai sumber pendapatan (kayu bakar, madu), sumber bahan pangan (umbi, daging), sumber air bersih, dan lainnya.

Teknik Konservasi Tanah dan Manfaat Lingkungannya

Masalah utama dalam pengelolaan sumber daya lahan adalah meningkatnya intensitas pemanfaatan tanpa disertai upaya pengelolaan yang tepat dan efektif sehingga tidak merusak lingkungan. Pengelolaan lahan yang tepat akan membantu menjaga kelestarian lingkungan, sehingga lahan akan lestari dan tetap memberi manfaat bagi generasi yang akan datang. Pengelolaan lahan berkelanjutan dan berwawasan lingkungan dapat direalisasikan dengan menerapkan teknik konservasi tanah agar laju degradasi tanah dapat dihambat dan sekaligus kualitas tanah dapat terjaga.

Degradasi tanah pada lahan pertanian, umumnya disebabkan adanya berbagai bentuk kerusakan, baik akibat aktivitas manusia sehingga menyebabkan terjadinya penurunan kualitas tanah dalam mendukung produksi tanaman dan terangkutnya hara-hara tanah (Kurnia *et al.* 2005). Erosi masih dianggap sebagai penyebab utama terjadinya degradasi tanah di Indonesia (Arsyad 2006, Kurnia *et al.* 1997). Upaya untuk menghilangkan erosi tanah secara total merupakan hal yang mustahil, namun menekan erosi atau mencegah erosi hingga batas yang diperbolehkan (*tolerable soil loss*) perlu terus diupayakan. Dampak erosi tidak hanya dirasakan oleh petani atau komunitas wilayah hulu, tapi juga akan dirasakan oleh masyarakat wilayah hilir berupa pendangkalan dam-dam penyimpan cadangan air dan saluran irigasi, pendangkalan sungai, pengendapan partikel-partikel tanah yang mengangkut bahan organik, hara, dan mungkin bahan beracun (Abdurachman dan Sutono 2002).

Tingkat laju erosi tanah pada lahan pertanian berlereng antara 3-15% di Indonesia tergolong tinggi, yaitu berkisar 97,5-423,5 t/ha/th, padahal banyak lahan pertanian berlereng lebih dari 15% (Abdurachman 2008). Upaya mengendalikan erosi telah banyak dilakukan melalui penerapan teknik konservasi tanah baik vegetatif maupun mekanik atau sipil teknik. Efektivitas masing-masing teknik konservasi tanah sangat bervariasi. Erosi akan mengangkut bahan organik dan unsur hara yang sangat dibutuhkan tanaman seperti yang ditunjukkan oleh hasil penelitian Sutono *et al.* (2004), di Kebun Percobaan (KP) Taman Bogo, Lampung Timur pada tanaman cabai rawit, sebagaimana disajikan pada Tabel 1. Pada lahan pertanian dengan kemiringan 3%, erosi yang terjadi mencapai 0,93-1,57 t/ha dan akan mengangkut P_2O_5 dan K_2O masing-masing sekitar 0,05-0,11 kg/ha dan 5,04-11,77 kg/ha sehingga hilang dari lapisan tanah. Hara yang hilang dari tanah setara dengan 0,14-0,31 kg/ha SP36 dan 11,2-26,2 kg/ha KCl, jumlah yang cukup besar bila dilihat agregasinya secara nasional.

Hasil penelitian Tambun *et al.* (2013) menunjukkan bahwa erosi permukaan berpengaruh terhadap kehilangan unsur hara N, P, dan K. Penelitian yang dilakukan pada lahan kering dengan kemiringan antara 12-40% dengan komoditas jagung di Desa Ulanta, Kec. Suwawa, Kab. Bone Bolango, Prov. Gorontalo memberikan fakta bahwa : (1) sekitar 59,1% unsur hara nitrogen yang

hilang pada lahan kering berlereng dipengaruhi oleh erosi permukaan; (2) jumlah kandungan unsur nitrogen yang terbawa oleh proses erosi permukaan sebesar 0,3%; (3) sekitar 50,9% unsur hara fosfor (P_2O_5) yang hilang pada lahan kering berlereng dipengaruhi oleh erosi permukaan; (4) kandungan unsur fosfor yang terbawa oleh proses erosi permukaan mencapai 86 ppm (P_2O_5); (5) sekitar 39,0% unsur hara kalium (K_2O) yang hilang pada lahan kering berlereng dipengaruhi oleh erosi permukaan; dan (6) kandungan unsur kalium yang terbawa oleh proses erosi permukaan sebesar 93 ppm (K_2O).

Tabel 1. Jumlah C-organik, P_2O_5 dan K_2O yang hilang terbawa erosi pada lahan dengan kemiringan 3% di KP Taman Bogo, Lampung Timur

Perlakuan	Jumlah erosi	Unsur terbawa erosi		
		C-organik	P_2O_5	K_2O
		----- kg/ha -----		
200 kg/ha SP36	960	5,38	0,05	5,04
200 kg/ha SP36+10 kg/ha pukan	1.570	10,68	0,11	11,77
2 t/ha P-alam	1.020	5,81	0,11	5,61
2 t/ha P-alam+10 kg/ha pukan	930	6,23	0,10	6,51

Sumber: Sutono *et al.* (2004)

Hasil penelitian di beberapa lokasi seperti Darmaga, Citayam, Jasinga, dan Pacet menunjukkan bahwa jumlah hara yang hilang cukup besar dari areal pertanian tanaman pangan. Selain itu, jumlah C-organik yang hilangpun cukup besar mencapai 4,7-9,9 t/ha (Tabel 2), yang seharusnya dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas tanah dan untuk mengganti kehilangan tersebut diperlukan pengembalian bahan organik sebanyak 8,3-17,4 t/ha. Penerapan teknik konservasi tanah perlu diaplikasikan secara berkesinambungan agar kehilangan hara dan bahan organik dapat ditekan. Kehilangan bahan organik dan hara melalui erosi seringkali diabaikan, padahal jumlahnya cukup besar dan peluang terjadinya *eutrofikasi* di wilayah hilir cukup tinggi.

Proses pengangkutan tanah dan hara melalui erosi bukan hanya berdampak terhadap areal dimana erosi terjadi (sumber erosi), tetapi juga berakibat menurunnya kondisi sumber daya air di daerah hilirnya. Selain terjadi pendangkalan dam-dam penyimpan cadangan air dan pendangkalan sungai, juga terjadi pengendapan partikel-partikel tanah yang tererosi di daerah cekungan. Akibat buruk dari kehilangan hara dan C-organik tidak hanya dirasakan oleh areal terkena (*on site*) tetapi juga sepanjang areal yang dilalui aliran permukaan dan bagian hilir sungai dimana air mengalir (*off site*).

Tabel 2. Jumlah erosi, C-organik, dan hara terangkut aliran permukaan pada lahan pertanian tanaman pangan di beberapa lokasi di Jawa Barat

Lokasi	Jumlah erosi ----- t/ha -----	C-organik ----- kg/ha -----	Hara		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Darmaga ¹⁾	90,1	9898	435,5	-	107,6
Citayam ²⁾	93,5	5974	1065,8	108,5	197,0
Jasinga ³⁾	90,5	4724	651,6	119,2	140,8
Pacet ⁴⁾	65,1		241	80,0	19,0

Sumber: ¹⁾Sinukaban 1990; ²⁾Suardjo 1981; ³⁾Undang Kurnia *et al.* 1997; ⁴⁾Suganda *et al.* 1997; ⁵⁾Banuwa 1994

Aplikasi teknik konservasi tanah seperti pemberian pupuk kandang, mulsa jerami dan mukuna telah terbukti mampu menekan jumlah erosi, C-organik dan hara yang cukup signifikan. Kurnia *et al.* (1997) membuktikan bahwa rehabilitasi lahan dengan pemberian amelioran dan mulsa mampu menekan erosi hingga 1,96 - 19,95 t/ha dari 93,48 t/ha bila tanpa rehabilitasi lahan (Tabel 3). Kehilangan C-organik dan hara N, P, dan K pun menurun drastis, terlihat dari kehilangan unsur N dari 1,07 t/ha menjadi 0,038 t/ha dengan mengaplikasikan mulsa jerami. Semakin besar hara yang hilang dari lapisan atas tanah, maka kebutuhan hara untuk pertumbuhan tanaman akan semakin tinggi karena tanah semakin miskin.



Gambar 1. Teknik konservasi tanah efektif dalam menekan kehilangan hara (Foto: Irawan)

Tabel 3. Jumlah C-organik dan hara terbawa erosi pada beberapa teknologi rehabilitasi lahan di Jasinga, Bogor

Teknologi rehabilitasi	Jumlah erosi	C-organik	Hara		
			N	P	K
		----- kg/ha -----			
Tanpa rehabilitasi	93.480	5.937,6	1.065,8	108,5	197,0
Pupuk kandang	19.950	1.057,5	292,2	35,5	68,2
Mulsa jerami	1.960	158,1	38,4	5,5	8,9
Mulsa mukuna	14.190	1.014,6	196,5	29,1	45,2

Sumber: Kurnia *et al.* (1997)

Pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa kemampuan penutupan mulsa jerami dalam menekan laju erosi cukup efektif, semakin rapat penutupan permukaan tanah maka semakin rendah erosi yang terjadi. Tanah yang dibiarkan terbuka akan mengangkut tanah melalui erosi sebesar 96,1 t/ha dan hara yang terangkut sekitar 432,5 kg/ha N; 9,3 kg/ha P₂O₅; dan 107,6 kg/ha K₂O, jauh lebih tinggi dibandingkan tanah yang ditutupi mulsa. Jumlah unsur N yang dapat dihemat dari penerapan mulsa jerami cukup tinggi yaitu 77,3-208,1 t/ha dan yang paling efektif menekan kehilangan unsur N adalah penutupan mulsa 60%.

Tabel 4. Jumlah C-organik dan unsur hara yang hilang melalui erosi sebagai pengaruh pemakaian mulsa

Penutupan mulsa jerami	Jumlah erosi	C-organik	N-total	P ₂ O ₅	K ₂ O
%					
		----- kg/ha -----			
0	96.100	9898,3	432,5	9,3	107,6
30	60.200	8428,0	355,2	6,2	61,3
60	40.800	9751,2	224,4	9,0	80,0
90	39.100	1573,6	246,3	9,9	106,1

Sumber: Sinukaban (1990)

Dixin *et al.* (1997) menyatakan bahwa penghematan kehilangan hara pada sistem *alley cropping* dan rorak cukup tinggi (Tabel 5). Efektivitas sistem *alley cropping* lebih tinggi dalam kemampuannya menekan kehilangan hara. *Alley cropping* mampu menghemat kehilangan hara N, P₂O₅, dan K₂O masing-masing sebesar 64,2%, 58,6%, dan 66,2%, sedangkan sistem rorak mampu menekan kehilangan hara N, P₂O₅, dan K₂O relatif lebih rendah, yaitu masing-masing sekitar 51,3%, 52,6%, dan 48,8%. Penerapan teknologi konservasi tanah tersebut akan sangat menguntungkan petani karena mampu menekan

kebutuhan pupuk, namun sekaligus pula menyelamatkan lingkungan dari pencemaran bahan kimia yang berasal dari pupuk.

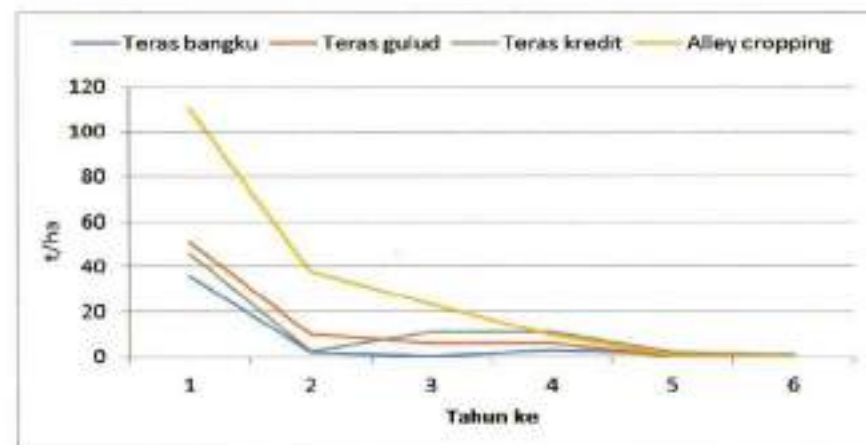
Teras gulud merupakan salah satu teknik KTA mekanik yang efektif dalam mengendalikan erosi pada lahan kering berlereng. Teras akan terbentuk karena adanya barisan guludan yang ditanami rumput penguat teras yang dapat menahan partikel tanah yang hanyut karena terbawa aliran permukaan. Teras gulud yang diperkuat dengan strip rumput *vetiver* dapat menurunkan erosi tanah dari 52,6 t/ha menjadi 8,80 t/ha atau efektivitasnya mencapai hampir 400% (Iswandi 2010). Kemudian teknik KTA vegetatif berupa strip rumput *King Grass* pada lahan berlereng 10-20% mampu mengurangi erosi tanah sekitar 40,6-72,0%. Selain itu, pemberian mulsa yang dikombinasikan dengan strip rumput dan barisan tanaman *Gliricidia* sp. mampu mengurangi erosi sebesar 74,1-74,4% pada lahan kering berlereng 10-20%.

Tabel 5. Jumlah penghematan kehilangan unsur hara yang hilang pada dua teknik konservasi tanah

Teknik konservasi tanah	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Kehilangan hara			
	----- kg/ha -----		
Rorak	172,8	46,8	672,8
Teknologi petani	354,7	98,9	1.313,8
<i>Alley cropping</i>	127,1	40,3	443,8
Lahan bera	1.016,4	360,5	4.667,4
Penghematan hara			
<i>Alley cropping</i> (kg /ha)	227,6	58,6	870,0
%	64,2	59,3	66,2
Rorak (kg /ha)	182,0	52,1	641,1
%	51,3	52,6	48,8

Dampak aplikasi teknologi konservasi tanah akan sangat menguntungkan pada jangka panjang. Gambar 1 memperlihatkan bahwa penerapan teknik konservasi tanah selama 6 tahun sangat efektif dalam mengendalikan erosi. Erosi yang terjadi pada tahun pertama berkisar 35,5-109,9 t/ha menurun hingga mencapai 0,5-1,5 t/ha pada tahun ke enam (Haryati 2007). Hal ini berarti jumlah hara yang hilangpun akan semakin kecil dan penghematan akibat berkurangnya kehilangan hara pada tahun keenam semakin tinggi. Penerapan teknologi sistem *alley cropping* ternyata sangat efektif dalam

menekan erosi dalam kurun waktu 6 tahun dibandingkan teknologi konservasi tanah mekanik.



Gambar 1. Erosi tanah dengan berbagai teknik konservasi tanah selama 6 tahun di Typic Eutropept, Ungaran (diolah dari Haryati 2007)

Valuasi Ekonomi Manfaat Aplikasi Teknik Konservasi Tanah

Salah satu bagian penting dari budi daya pertanian pada lahan kering berlereng yang sering terabaikan oleh para praktisi pertanian di Indonesia adalah konservasi tanah. Salah satu penyebabnya antara lain karena dampak degradasi tanah tidak selalu segera terlihat di lapangan, atau tidak secara drastis menurunkan hasil panen. Misalnya, dampak erosi tanah terhadap hasil usaha tani tidak segera dapat dilihat seperti halnya dampak tanah longsor atau banjir bandang. Padahal tanpa tindakan konservasi tanah yang efektif, produktivitas lahan yang tinggi dan usaha pertanian sulit terjamin keberlanjutannya (Adimihardja 2008).

Erosi tanah pada usaha tani lahan kering berlereng merupakan suatu keniscayaan. Pada jenis tanah yang sama, tingkat erosi tanah akan semakin besar manakala intensitas hujan tinggi, lereng lahan semakin tajam dan panjang, dan tanpa aplikasi teknik konservasi tanah dan air (KTA) yang memadai. Erosi menyebabkan tanah dan unsur hara yang ada di dalamnya ikut terbawa, sehingga kesuburan tanah berkurang dan produktivitas tanah akan rendah, yang pada akhirnya pendapatan dan kesejahteraan petani akan menurun. Di sisi lain, erosi pada lahan pertanian akan mempunyai dampak negatif terhadap kualitas lingkungan di wilayah hilir DAS, antara lain banjir dan pendangkalan badan air, seperti sungai dan waduk. Akibat dari itu semua diperlukan biaya

penanggulangan, baik melalui anggaran pemerintah seperti untuk pengerukan sungai, waduk/dam, dan perbaikan sarana-prasarana umum, maupun pengeluaran masyarakat hilir untuk perbaikan rumah, alat rumah tangga, dan kehilangan harta-benda.

Cukup banyak penelitian yang membahas valuasi ekonomi aplikasi teknik KTA. Salah satu penelitian berskala DAS menunjukkan bahwa kerugian ekonomi akibat erosi tanah berupa kehilangan unsur hara N, P, dan K di DAS Magat, Filipina mencapai US \$ 50 – 127 /ha (Barbier 1995). Jika dinilai dengan kurs saat ini, rata-rata nilai ekonomi kerugian tersebut mencapai Rp 973.500 /ha. Kerugian tersebut bisa dihindari apabila diterapkan teknik KTA pada lahan pertanian. Hasil penelitian pada skala percobaan lapangan, Kumia *et al.* (1998) menunjukkan bahwa besaran biaya pengendalian erosi tanah pada lahan kering berjenis tanah *Typic Haplohumults* sangat tergantung pada teknik konservasi tanah yang diterapkan. Biaya pengendalian erosi tanah dengan menggunakan mulsa jerami padi adalah Rp 2.175 /t tanah tererosi, jauh lebih tinggi daripada menggunakan mulsa *Mucuna sp.* sebesar Rp 1.640 /t tanah tererosi.

Perhitungan nilai ekonomi aplikasi teknik KTA dengan pendekatan biaya pengganti telah dilakukan oleh Melisa (2010) pada kawasan hutan lindung Wosi-Rendani, Manokwari, dan Papua Barat. Pada penelitian tersebut besaran biaya pengganti kehilangan tanah dan unsur hara makro (N, P, K) akibat erosi mencapai Rp 4,5 juta/ha/tahun. Kemudian Sutrisno *et al.* (2012) menghitung nilai ekonomi aplikasi teknik konservasi tanah (KTA) dengan pendekatan serupa, yakni menggunakan biaya pembelian pupuk untuk mengembalikan kesuburan tanah. Unsur hara yang dianalisis adalah N, P, K, dan bahan organik. Biaya pengganti atas kehilangan unsur hara tersebut di area Sub DAS Keduang mencapai Rp 100 milyar/tahun atau sebesar Rp. 2,4 juta/ha/th. Biaya pengganti unsur N dan bahan organik merupakan biaya pengganti terbesar karena kandungan unsur N dan bahan organik dalam tanah di Sub DAS Keduang tergolong paling besar dibandingkan kandungan unsur hara lainnya. Biaya pengganti tersebut belum termasuk untuk mengganti lapisan tanah yang hilang.

Devi (2013) menyajikan hasil penelitian yang menarik terkait dengan nilai ekonomi penerapan teknik konservasi tanah pada lahan kering dataran tinggi dengan komoditas kentang di Kab. Garut, Jawa Barat. Pada penelitian tersebut teknik KTA yang dianalisis adalah sistem penanaman kentang yang membentuk jalur-jalur tumpukan tanah (bedengan) yang memanjang menurut kontur atau melintang lereng (guludan searah kontur). Kemudian sebagai pembandingnya adalah pertanaman kentang yang bedengannya dibuat ke arah bawah lereng atau searah lereng. Pada pertanaman "Pembanding" tersebut memungkinkan terjadi erosi dan aliran permukaan yang tidak terkendali karena air hujan akan mengalir dengan cepat ke bawah melalui alur-alur diantara tumpukan tanah sehingga mempercepat degradasi lahan yang menyebabkan lahan kritis dan usaha tani tidak berkelanjutan. Nilai ekonomi aplikasi teknik konservasi tanah

tersebut mencapai Rp 10,163 juta/ha. Nilai tersebut merupakan tambahan nilai manfaat langsung (*direct incremental benefit*) aplikasi teknik KTA yang diperoleh petani (*on-site impact*) dan besarnya sangat tergantung pada tingkat manajemen usaha tani antar petani, nilai pasar komoditas dan kondisi lahan usaha tani. Selain nilai manfaat langsung penerapan teknik KTA pada petani kentang tersebut memberikan manfaat tidak langsung kepada masyarakat hilir berupa pengendalian dampak erosi dan aliran permukaan, seperti banjir dan kelangkaan sumber daya air.

Berdasarkan metode CVM, Irawan (2007) menduga fungsi WTA petani lahan kering untuk menerapkan teknik KTA di Sub DAS Citirik, Jawa Barat. Analisis sidik ragam fungsi dugaan WTA tersebut disajikan pada Tabel 6. Paling tidak ada dua hal yang menarik dari fungsi WTA tersebut, yakni:

- (1) Tanda negatif koefisien linear variabel luas lahan (LUAS) yang nilai absolutnya lebih besar daripada koefisien kuadratnya menunjukkan bahwa besaran WTA bergerak menurun dengan cepat sejalan dengan peningkatan luas lahan, tetapi kemudian meningkat kembali pada besaran luas lahan tinggi tertentu. Petani berlahan sempit memerlukan tambahan modal untuk investasi penerapan teknik KTA karena kondisi finansialnya kekurangan modal, tetapi petani berlahan luas juga memerlukan tambahan modal karena mereka menyadari tingginya biaya investasi penerapan teknik KTA pada lahan usaha taninya.
- (2) Dikaitkan dengan biaya investasi yang diperlukan untuk menerapkan teknik KTA pada lahan kering nilai WTA petani tersebut sekitar 44%-132% bagi penerapan sistem terasering atau 74%-220% bagi penerapan sistem vegetatif. Pada luas lahan garapan antara 1,75-2,0 ha insentif minimal yang dapat menggerakkan petani untuk menerapkan teknik KTA sekitar 45% dan 74% dari kebutuhan biaya investasi masing-masing untuk sistem terasering (teras bangku atau teras gulud) dan sistem vegetatif. Relatif tingginya proporsi insentif minimal untuk menerapkan sistem vegetatif ada kaitannya dengan relatif rendahnya investasi untuk penerapan teknik KTA vegetatif, dibanding mekanik dan kurang diminatinya teknik vegetatif oleh petani karena menanam rumput, sebagai contoh, belum tentu memberikan manfaat langsung karena petani tidak memiliki ternak.

Melalui pendekatan nilai pilihan dan keberadaan yang didasarkan pada penilaian masyarakat setempat, Sihite (2001) menghitung nilai ekonomi manfaat lingkungan penerapan teknik konservasi, berupa strip rumput dan rorak pada usaha tani berbasis tanaman kopi di DAS Besai, Lampung, baik pada wilayah sumber dampak (*on-site*) maupun wilayah penerima dampak atau hilir DAS (*off*

site). Salah satu hasilnya menunjukkan bahwa kehilangan tanah yang dikonversikan ke dalam kehilangan hara dalam bentuk pupuk memperlihatkan nilai ekonomi kerugian pada lokasi *on-site*, baik pada tingkat usaha tani maupun hulu DAS yang cukup besar. Demikian halnya nilai manfaat lingkungan untuk wilayah hilir DAS relatif lebih besar lagi, sekalipun dampak *off-site* yang dinilai terbatas pada fungsi DAS dalam menyediakan air, yakni untuk menghasilkan daya listrik dan pasokan air untuk penduduk setempat, sebagaimana disajikan pada Tabel 7.

Tabel 6. Analisis sidik ragam dan regresi WTA petani untuk menerapkan teknik konservasi tanah pada lahan kering di Sub DAS Citarik, Jawa Barat (Sumber: Irawan 2007)

Sumber Keragaman	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F_value	Prob > F
Model	10	151,012	15,101	4,947	0,0001
Error	64	195,378	3,053		
C Total	74	346,391			

Variable	Derajat Regresi	Koefisien	Standard Error	T_value	Prob > T
INTERCEPT	1	7,594	1,1799	6,436	0,0001
D_TP	1	1,108	0,4375	2,534	0,0137
D_TB	1	-0,765	0,4577	-1,673	0,0992
PDK	1	-0,135	0,0867	-1,564	0,1228
JML_AK	1	-0,357	0,1418	-2,519	0,0142
D_PKL	1	-0,552	0,5735	-0,964	0,3386
Income	1	0,239	0,1445	1,660	0,1017
Income ²	1	-0,007	0,0057	-1,295	0,1999
Luas	1	-4,968	1,2087	-4,110	0,0001
Luas ²	1	1,372	0,4663	2,943	0,0045

Catatan : $R^2 = 0,436$; Variabel tak bebas adalah WTA (*willingness to accept*) petani lahan kering untuk menerapkan teknik KTA ; D_TP = variabel *dummy* tanaman pangan vs *agroforestry*; D_TB = variabel *dummy* bentuk KTA teras bangku vs lainnya; PDK = tingkat pendidikan petani; JML_AK = jumlah anggota keluarga; D_PKL = variabel *dummy* ada vs tidak adanya sumber pendapatan petani dari luar usaha tani; Income = Pendapatan petani; Luas = luas lahan usaha tani

Tabel 7. Nilai ekonomi lingkungan dampak penerapan teknik KTA pada sumber dampak (*on-site*) dan wilayah penerima manfaat (*off-site*) di DAS Besai, Lampung

No	Manfaat (Benefit) dan Biaya (Cost)	Usaha tani	Lingkup DAS*)
Dampak <i>on-site</i> di Hulu DAS:			
1.	Manfaat	(Rp /ha/th)	(Rp/th)
	-Nilai produktivitas lahan kering	5.831.722	233.268.880.000
2.	Biaya		
	-Input/sarana produksi pertanian	2.367.974	94.718.960.000
	-Kerugian akibat erosi tanah	72.367	2.905.366.885
	-Total biaya di bagian hulu DAS	2.440.341	97.624.326.885
3.	Selish (Manfaat - Biaya)	3.391.381	124.842.553.115
Dampak <i>off-site</i> di Hilir DAS:			
1.	Manfaat		
	-Pengisian air tanah		90.000.000
	-Produksi tenaga listrik		93.237.279.000
	Total manfaat <i>off-site</i>		93.327.279.000
2.	Biaya		
	-Biaya penggelontoran sedimen		13.600.000
	-Kerugian akibat penurunan produksi listrik		3.483.195.000
	-Biaya pemenuhan air minum penduduk		52.334.343
	Total biaya di bagian hilir DAS		3.549.129.343
3.	Selish (Manfaat-Biaya)		89.778.0499.657

Sumber: Sihite 2001 (dimodifikasi).

Catatan: *) Luas DAS Besai 54.967 ha terdiri atas sawah (3.868 ha) dan lahan kering (51.099 ha)

Penutup

Tindakan konservasi tanah bukan hanya menurunkan erosi dan menurunkan kesuburan tanah dan produktivitas tanah pada wilayah sumber dampak di hulu DAS (*on-site*) tetapi juga berpengaruh terhadap kualitas lingkungan wilayah penerima manfaat di hilir DAS (*off-site*). Dampak *off-site* merupakan jasa yang dinikmati oleh publik, namun biayanya selama ini ditanggung oleh petani secara individu. Mengingat hal itu, maka penerapan dan pengembangan teknik konservasi tanah dan air pada lahan pertanian tidak dapat diserahkan sepenuhnya kepada inisiatif dan kemampuan petani saja, tetapi masyarakat hilir yang menerima manfaatnya perlu dilibatkan, khususnya dalam aspek pendanaan. Di dalam hal ini peran pemerintah sangat penting dan menentukan, terutama terkait dengan bentuk kelembagaan dan regulasi sistem pendanaan ini.

Insentif yang diperlukan petani lahan kering agar dapat menerapkan teknik konservasi tanah pada lahan usaha taninya, berdasarkan pendekatan kesediaan petani untuk menerapkan (WTA) sekitar 45-74% dari nilai biaya investasinya. Teknik konservasi yang strategis untuk dibantu pembiayaannya antara lain yang berbasis vegetatif dan pengelolaan bahan organik, seperti strip rumput dan rorak.

Daftar Pustaka

- Adimihardja, A. 2008. Teknologi dan strategi konservasi tanah dalam kerangka revitalisasi pertanian. *Pengembangan Inovasi Pertanian* 1(2): 105-124.
- Abdurachman, A. dan Sutono. 2002. Teknologi pengendalian erosi lahan berlereng. 103-145 *dalam* Abdurachman dan Mappaona (Eds.). *Teknologi Pengelolaan Lahan Kering Menuju Pertanian Produktif dan Ramah Lingkungan*. Pusat Penelitian Tanah dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Arsyad, 2006. *Konservasi Tanah dan Air*. IPB Press. Bogor.
- Barbier E.B. 1995. The Economics of soil erosion: Theory, Methodology and Examples. Paper presented on the Fifth Biannual Workshop on Economy and Environment in Southeast Asia. Singapore. (Unpublished).
- Devi, D.A. 2013. Analisis Nilai Ekonomi Konservasi dan Faktor-faktor yang Mempengaruhi Peluang Adopsi Konservasi Usaha Tani Kentang Dataran Tinggi di Kecamatan Pasirwangi Kabupaten Garut. Skripsi Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Bogor.

- Dian, Y., Z.Changhua, and T.Huabin. 1997. Management of sloping lands for sustainable agriculture in Southern China. Pp. 61 - 79 *In* : The Management of Sloping Land in Asia (IBSRAM/ASIALAND). Network Document no.22 IBSRAM.
- Gittinger, JP. 1982. *Economic Analysis of Agricultural Project*. UI-Press-John Hopkins. Jakarta. 445 p.
- Haryati, U., Haryono, dan A. Abdurachman. 1995. Pengendalian erosi dan aliran permukaan serta produksi tanaman pangan dengan berbagai teknik konservasi pada tanah Typic Eutropepts di Ungaran, Jawa Tengah. *Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk* 13 : 40 - 50. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Haryati, U., 2007. Strategi Implementasi Sistem Usaha tani Konservasi di Lahan Kering Daerah Aliran Sungai Bagian Hulu. Makalah Seminar dan Kongres Nasional VI Masyarakat Konservasi Tanah Indonesia (MKTI). 17- 18 Desember 2007. Cisarua, Bogor. (Tidak dipublikasikan).
- Irawan. 2007. *Valuasi Ekonomi Lahan Pertanian: Pendekatan Nilai Manfaat Multifungsi Lahan Sawah dan Lahan Kering*. Disertasi. Fakultas Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, IPB. Bogor.
- Iswandi. 2010. *Inovasi Teknologi Konservasi Lahan Kering Berlereng dan Strategi Pengembangannya*. Orasi Pengukuhan Profesor Riset Bidang Budi daya Tanaman Pangan. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian. Jakarta.
- Kurnia, U., Sudirman, dan H. Kusnadi. 2005. Teknologi rehabilitasi dan reklamasi lahan terdegradasi. Hal. 141-168 *dalam* Abdurachman dan Mappaona (Eds.). *Teknologi Pengelolaan Lahan Kering Menuju Pertanian Produktif dan Ramah Lingkungan*. Pusat Penelitian Tanah dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Kurnia, U., N. Sinukaban, K. Mudikdjo, dan Suwardjo. 1998. Penilaian ekonomi cara-cara rehabilitasi lahan Typic Haplohumults di Jasinga, Jawa Barat. *Jurnal Tanah dan Iklim* 16: 28-33.
- Kurnia, U., N. Sinukaban, G. Suratmo, H. Pawitan, dan H. Suwardjo. 1997. Pengaruh teknik rehabilitasi lahan terhadap produktivitas tanah dan kehilangan hara. *Jurnal Tanah dan Iklim* No. 15: 10-18.
- Liao, M. and H. Wu. 1987. *Soil on Steep Lands in Taiwan*. The Chinese Soil and Water Conservation Society.
- Melisa, E.D. 2010. *Nilai Ekonomi Degradasi Lingkungan Akibat Erosi Pada Hutan Lindung Wosi-Rendani Kabupaten Manokwari*. Skripsi. Jurusan

- Manajemen Hutan. Fakultas Kehutanan, Universitas Negeri Papua, Manokwari.
- Napier, T.L.M., Tucker, and S.Mc Carter. 2000. Adoption of conservation production system in tree rid west watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation* 55 : 123 – 134.
- Natural Resources Management Project (NRMP). 1996. Values of Preserving Forest Near Bukit Baka-Bukit Raya, Kalimantan. Report No. 67. NRMP, Jakarta. (Unpublished).
- Othman J., J. Bennet, and R. Blamey. 2004. Environmental values and resources management options: a Choice modeling experience in Malaysia. *Environment and Development Economics* 9 (6): 802-824.
- PSLH UGM. 2001. Metode Valuasi Ekonomi Lingkungan. Edisi I. Pusat Studi Lingkungan Hidup, Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Rachmansyah, Y. 2010. Pentingnya valuasi ekonomi dalam pengelolaan kawasan konservasi yang lestari. *Prestasi* 6 (2): 100-110.
- Sihite, J. 2001. Evaluasi Dampak Erosi Tanah Model Pendekatan Ekonomi Lingkungan dalam Perlindungan DAS: Kasus Sub-DAS Besai – DAS Tulang Bawang, Lampung. Fakultas Pasca Sarjana, IPB, Bogor. 103 pp. <http://www.worldagroforestry.org/soa/publications/files/workingpaper/wp0029-04.pdf>.
- Sinukaban, N. 1990. Pengaruh pengolahan tanah konservasi dan pemberian mulsa jerami terhadap produksi tanaman pangan dan erosi hara. *Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk* 9 : 32-45.
- Serafi, S.E. 1997. Pricing The Invaluable: The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Journal Ecological Economics*.
- Steer, A. 1996. Ten Principles of The New Environmentalism. Finance and Development.
- Suganda, H., M. S. Djunaedi, D. Santoso, dan S. Sukmana. 1997. Pengaruh cara pengendalian erosi terhadap aliran permukaan tanah tererosi dan produksi sayuran pada Andisols. *Jurnal Tanah dan Iklim* 15: 38-50.
- Suparmoko, M. dan M.R. Suparmoko. 2000. *Ekonomika Lingkungan*. Edisi I. BPPE. Yogyakarta. 365 hal.
- Sutono, M.S. Djunaedi, D. Erfandi, dan U. kurnia. 2004. Pengangkutan hara oleh erosi, aliran permukaan, perkolasi dan tanaman cabai rawit pada tanah Typic Kanhapludult di Taman Bogo. Hal. 97-122 *dalam* Prosiding

- Seminar Nasional Inovasi Teknologi Sumber Daya Tanah dan Iklim. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Sutrisno, J., B. Sani, A. Saefuddin, dan SRP. Sitorus. 2012. Valuasi ekonomi erosi lahan pertanian di Sub Daerah Aliran Sungai Kedung Kabupaten Wonogiri. *SEPA*. 8(2):51-62.
- Suwardjo, H. 1981. Peranan Sisa-sisa Tanaman dalam Konservasi Tanah dan Air pada Usaha Tani Tanaman Semusim. Disertasi Fakultas Pasca Sarjana, IPB, Bogor.
- Tambun, B.V., F. Lihawa, dan D. Yusuf. 2013. Pengaruh Erosi Permukaan terhadap Kandungan Unsur Hara N,P,K Tanah pada Lahan Pertanian Jagung di Desa Ulanta Kecamatan Suwawa Kabupaten Bone Bolango Prov. Gorontalo. Skripsi. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Negeri Gorontalo. Gorontalo.
- Yakin, A., 1997. *Ekonomi Sumber daya dan Lingkungan: Teori dan Kebijakan Pembangunan Berkelanjutan*. Akademika Presindo. Jakarta.

11. KESIMPULAN UMUM

Fahmuddin Agus dan Achmad Rachman

Peneliti Balitbangtan di Balai Penelitian Tanah

Gejala perubahan iklim semakin nyata yang ditandai dengan peningkatan suhu atmosfer, peningkatan frekuensi cuaca ekstrim (musim hujan semakin basah dan musim kemarau semakin panjang) serta semakin sulitnya cuaca diramalkan (*unpredictability*). Prioritas utama pembangunan pertanian adalah bagaimana melakukan penyelamatan (*adaptasi*) agar pertanian lebih tangguh (*resilient*) sehingga secara berkelanjutan tetap dapat menghasilkan bahan pangan, serat, dan sumber energi terbarukan. Prioritas kedua adalah ikut memitigasi emisi gas rumah kaca. Aksi mitigasi tersebut dapat bersinkronisasi dengan aksi adaptasi untuk mendatangkan keuntungan privat yang maksimal bagi pengelola lahan dan keuntungan publik berupa penurunan emisi gas rumah kaca serta keuntungan tambahan lainnya (*co-benefit*). Konservasi tanah dan air berperan penting, baik dalam aksi adaptasi maupun mitigasi perubahan iklim.

Konservasi Tanah dan Peningkatan Efisiensi Penggunaan Air

Berbagai hasil penelitian dan teori tentang konservasi tanah dan air menunjukkan bahwa pengolahan tanah konservasi (*conservation tillage*), daur-ulang limbah pertanian dalam bentuk mulsa atau kompos (pupuk organik), penanaman tanaman penutup tanah (*cover crops*), panen dan daur-ulang air limpasan permukaan, penghematan penggunaan air, konservasi secara vegetatif, pertanaman campuran (*multiple cropping*), dan terasering mampu mencegah penghanyutan permukaan tanah yang subur dari lahan pertanian ke saluran dan badan air. Teknik-teknik konservasi tanah tersebut juga meningkatkan daya infiltrasi air ke dalam tanah dan meningkatkan kapasitas tanah memegang air (*water holding capacity*), sehingga secara simultan akan mengurangi genangan air di permukaan tanah dan risiko banjir pada waktu musim penghujan dan risiko kekeringan pada musim kemarau. Budi daya pertanian yang menerapkan salah satu atau kombinasi dari beberapa teknik konservasi tanah tersebut akan memperbaiki kualitas lahan pertanian antara lain agregat tanah lebih stabil dan gembur, keseimbangan hara dalam tanah lebih baik, penggunaan pupuk kimia akan lebih sedikit, dan sumber mata air lebih banyak sehingga keuntungan usaha tani akan lebih tinggi dan berkelanjutan (*sustainable*).

Dinamika Karbon Tanah

Kata kunci terpenting dalam konservasi tanah adalah bahan organik, karena bahan organik tanah adalah senyawa yang sangat akrab dengan keseharian tindakan petani. Di lain sisi kandungan bahan organik juga berhubungan langsung dengan simpanan dan dinamika karbon (C) di dalam tanah, di dalam biomas tumbuhan pada serasah dan jaringan tumbuhan yang mati (*necromass*), serta karbon di atmosfer yang mempengaruhi perubahan iklim.

Karbon yang tersimpan di dalam tanah selain mempengaruhi kualitas tanah, juga merupakan cadangan karbon (*carbon stock*) dalam jumlah besar. Kandungan karbon organik (*organic carbon content*) dalam satuan masa karbon per masa padatan tanah dan cadangan karbon dalam satuan masa karbon persatuan luas dan ketebalan tanah merupakan dua indikator penting yang tidak terpisahkan. Kandungan karbon penting sebagai indikator kesehatan tanah, sedangkan cadangan karbon penting untuk menilai sumbangan suatu bentang lahan (*landscape*) dalam mitigasi perubahan iklim. Selain karbon di dalam tanah, cadangan karbon pada suatu bentang lahan juga terdapat pada tumbuhan. Dalam hal ini masa bahan organik (biomas dan nekromas) merupakan indikator penting cadangan karbon suatu bentang lahan selain cadangan karbon di dalam tanah. Cadangan karbon yang tinggi berkorelasi negatif dengan emisi karbon dalam bentuk karbon dioksida (CO_2) dan metana (CH_4).

Kandungan karbon di dalam tanah perlu dioptimalkan sampai mencapai konsentrasi tertentu. Kandungan karbon berbagai jenis tanah mineral perlu dipertahankan antara 2-5%, pada Andisols sekitar 5-10% dan Histosols (tanah gambut) antara 30-60%. Kuncinya adalah dengan menerapkan daur-ulang bahan organik dan berbagai metode konservasi, terutama konservasi vegetatif.

Peningkatan Cadangan Karbon Tanah dengan Pendekatan Zero Waste

Cadangan karbon di dalam tanah dapat ditingkatkan dengan meningkatkan kandungan bahan organik tanah dan mempertebal lapisan tanah yang tinggi kandungan bahan organiknya. Cadangan karbon pada biomas dan nekromas dapat ditingkatkan melalui penanaman tanaman pohon-pohonan dengan biomas tinggi, misalnya melalui pendekatan *multistrata cropping* dan dengan tidak membiarkan permukaan tanah dalam keadaan bera.

Upaya konvensional, namun tetap penting dan populer dalam peningkatan kandungan karbon tanah adalah melalui penerapan olah tanah konservasi baik olah tanah minimum, maupun tanpa olah tanah serta konservasi tanah secara vegetatif. Pendekatan yang lebih mutakhir adalah melalui nir

limbah (*zero waste*) di mana setiap limbah organik dimanfaatkan kembali dan muara terakhir dari limbah (misalnya kotoran sapi yang sudah melalui *methane digester*) adalah tanah. Pendekatan lain yang banyak disarankan di berbagai belahan dunia adalah penggunaan *biochar* (arang yang dibuat melalui proses pembakaran tidak sempurna atau *pyrolysis* bahan organik sisa tanaman).

Pertanian nir limbah harus memenuhi beberapa kriteria: produksi dan keuntungan yang tinggi (*High production and profitability*), rendah emisi GRK (*low greenhouse gases*), sangat efisien dalam penggunaan air (*efficient water use*), nir limbah (*zero waste*) dan rendah erosi serta sedimentasi (*clear run-off water*). Kelima kriteria ini harus berjalan secara simultan.

Penerapan pertanian nir limbah dimulai dengan analisis perhitungan karbon (*carbon footprint*) dari sistem pertanian untuk menentukan semua sumber karbon dan serapan (*sink*) gas rumah kaca (GRK). Dari analisis ini akan dapat ditentukan sumber utama emisi GRK (*hotspots*), sehingga dapat direncanakan pendekatan yang dapat menurunkan emisi dari sumber tersebut serta dengan menilai apa manfaat adaptasi dari penurunan emisi tersebut.

Isu Khusus Lahan Gambut

Tanah gambut merupakan kasus khusus untuk Indonesia karena Indonesia memiliki sekitar 14,9 juta ha lahan gambut. Tanah gambut dalam keadaan alami, ketebalannya antara 0,5 m sampai lebih dari 10 m yang komposisinya terutama adalah bahan organik dan air. Kandungan bahan organik dari masa kering tanah gambut berkisar antara 30 sampai mendekati 100% dan kandungan karbonnya berkisar antara 18 sampai 66%.

Pada kondisi alami, secara perlahan lahan gambut menyerap karbon dari atmosfer (memitigasi GRK terutama CO_2) melalui biomas tumbuhan dan selanjutnya pelapukan tumbuhan yang mati di atas permukaan tanah. Karena proses tersebut, hutan gambut alami semakin bertambah ketebalannya dengan laju penebalan sekitar 0-3 mm per tahun. Akan tetapi konversi dan drainase lahan gambut untuk berbagai keperluan pembangunan menyebabkan gambut berubah sifatnya dari penyerap menjadi sumber emisi CO_2 . Emisi dan pemadatan lahan gambut yang didrainase menyebabkan penurunan permukaan gambut (*subsidence*) sekitar 20-60 mm per tahun. *Subsidence* yang tinggi akan memperpendek umur pakai lahan gambut untuk pertanian karena apabila penurunan permukaan mendekati permukaan badan air alami maka lahan akan berada pada kondisi tidak dapat lagi didrainase (*non-drainable state*) sehingga tidak cocok lagi ditanami, kecuali untuk tanaman *aquatic*. Besarnya potensi emisi dari lahan gambut, menyebabkan lahan ini mendapat perhatian khusus di

kalangan pemerhati lingkungan, karena berpotensi menyumbang pemanasan global.

Pendekatan utama dalam meminimalkan emisi gas rumah kaca dan penurunan permukaan gambut adalah dengan mencegah penurunan muka air tanah (*water table*), misalnya dengan menggunakan pintu air (*tabat*). Selain itu berbagai metode dilakukan, misalnya dengan menggunakan ameliorant (bahan pembenah tanah gambut) untuk menurunkan emisi dan memperbaiki kesuburan tanah. Respon tanah terhadap perlakuan ameliorasi tersebut bervariasi secara spasial dan temporal. Pengaruh penggunaan ameliorant terhadap perbaikan pertumbuhan dan produksi tanaman (misalnya dengan penggunaan pupuk kandang dan/atau dolomit sebagai pembenah tanah) lebih konsisten dibandingkan pengaruhnya terhadap penurunan emisi GRK.

Pengelolaan Tanah dengan Masalah Khusus

Tanah dapat mengalami berbagai masalah, baik karena pengelolaan oleh manusia maupun karena proses alami. Masalah tersebut antara lain adalah (1) salinitas di daerah pantai; (2) pencemaran tanah oleh logam berat; dan (3) kerusakan tanah bekas tambang terbuka (*open mining*).

Pencemaran logam berat

Pencemaran logam berat pada lahan pertanian dapat berasal dari lahan pertanian itu sendiri atau dari lahan non-pertanian. Sumber non-pertanian berasal dari limbah industri, pertambangan, perkotaan dan rumah tangga. Pencemaran dari pertanian dapat berasal dari penggunaan pupuk dan pestisida yang berlebihan. Logam berat yang sering menjadi masalah dalam produksi pertanian adalah tembaga (Cu), kromium (Cr), seng (Zn), air raksa (Hg), timah hitam (Pb), kobalt (Co), molybdenum (Mo), mangan (Mn), arsen (As), dan nikel (Ni). Dalam konsentrasi tinggi, logam berat dari tanah dan air dapat memasuki jaringan tanaman sehingga bermuara pada makanan dan hewan ternak melalui rantai makanan (*food web*). Oleh karena itu dapat mengancam kesehatan manusia.

Berbagai pendekatan dilakukan untuk menurunkan konsentrasi logam berat, misalnya pemanasan untuk logam berat yang mudah menguap seperti Hg, As, dan Cd, penimbunan tanah, pencucian dan pendekatan kimia.

Remediasi bisa dilakukan secara *in situ* pada lahan pertanian untuk pencemaran ringan atau *ex situ* dengan menggali dan mengangkut tanah yang terkontaminasi berat ke luar lahan pertanian.

Remediasi pencemaran oleh logam berat dapat dilakukan dalam bentuk imobilisasi, pencucian dan fitoremediasi.

Imobilisasi biasanya dilakukan dengan menggunakan amelioran organik dan anorganik seperti tanah liat, kapur, zeolit, kompos, arang aktif, bentonit (montmorillonit) dan/atau mikroba. Pencucian tanah dapat terjadi secara alami, melalui pengaliran air atau secara *ex situ* bila pencemaran cukup serius.

Fitoremediasi disebut juga remediasi hijau menggunakan tanaman yang toleran terhadap konsentrasi logam berat tinggi. Tanaman tersebut menyerap logam berat berbahaya dan logam yang terakumulasi pada tanaman sehingga mengurangi konsentrasi logam berat di dalam tanah. Tanaman tersebut tidak dibolehkan untuk dikonsumsi oleh manusia dan hewan. Contoh tanaman untuk remediasi jenis ini adalah dari keluarga *Brassicaceae*, *Fabaceae*, *Euphorbiaceae*, *Asteraceae*, *Lamiaceae*, dan *Scrophulariaceae*.

Salinitas

Salinitas dapat terjadi karena naiknya permukaan air laut, karena intrusi air laut ke daratan yang disebabkan oleh kosongnya rongga-rongga tanah akibat pemompaan air tanah yang berlebihan, peningkatan muka air laut, penguapan terlalu tinggi di permukaan tanah (evaporasi) atau karena kejadian tsunami. Salinitas tanah $>8 \text{ dS m}^{-1}$ tergolong tinggi dan berpotensi mengganggu pertumbuhan tanaman tertentu. Masalah salinitas diatasi dengan pengaturan tata air (irigasi dan drainase), pengolahan tanah, penggunaan pembenah tanah seperti gypsum, kompos, dan pupuk kandang. Pendekatan lain adalah dengan pemilihan tanaman yang toleran terhadap tanah salin.

Tanah bekas tambang

Penambangan terbuka menyebabkan terjadinya pembongkaran lapisan tanah dan bukit-bukit serta penggalian sampai berpuluh-puluh meter di bawah permukaan tanah. Ini menyebabkan lapisan tanah yang subur tertimbun serta lapisan tanah yang miskin hara dan bahan induk tanah tersingkap ke permukaan tanah. Rehabilitasi dilakukan dengan peningkatan kandungan bahan organik dan hara tanah serta penanaman tanaman pionier yang toleran terhadap kesuburan rendah.

Aspek Sosial Ekonomi dari Konservasi Tanah

Setiap tindakan konservasi tanah mempunyai konsekuensi biaya dan tenaga kerja dan memberikan peluang mendapatkan keuntungan dengan tingkat yang berbeda-beda. Pemilihan suatu teknik konservasi bisa saja berpengaruh terhadap produksi tanaman, namun perlu dipertimbangkan apakah kenaikan produksi tersebut juga memberikan keuntungan yang layak secara ekonomi.

Karena itu perlakuan yang tidak signifikan menaikkan hasil, namun mahal biayanya, tidak diprioritaskan sedangkan perlakuan dengan biaya murah namun konsisten meningkatkan produksi dijadikan pilihan.

Selain memberikan keuntungan privat, tindakan konservasi juga memberikan jasa (*services*) berupa penurunan emisi gas rumah kaca, pengurangan risiko banjir, dan peningkatan kenyamanan (*amenity*) suatu bentang lahan yang dapat dinikmati oleh publik. Pada sistem pasar yang berlaku sekarang jasa ini tidak dapat dipasarkan (*non-marketable*). Oleh karena itu mekanisme untuk menjadikannya sebagai *marketable services* perlu dirumuskan dalam kebijakan, sehingga jasa tersebut tetap dapat dihasilkan secara berkelanjutan oleh petani yang menerapkan teknik tersebut.

Informasi lebih lanjut :
Balai Penelitian Tanah
Jalan Tentara Pelajar No. 12 Cimanggu, Bogor
Tel/fax: 0251 8336757 dan 8321608



SCIENCE.INNOVATION.NETWORKS

www.itsang.agropn.go.id



**IAARD
PRESS**

Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian
Jl. Ragunan No. 29 Pasar Minggu, Jakarta 12540
Telp.: 62 21 806202, Faks.: 62 21 7800644

ISBN 978-602-1520-90-1



9 786021 152090