

KONTRIBUSI LAHAN SAWAH TERHADAP PELESTARIAN LINGKUNGAN

Fahmuddin Agus¹ dan Prihasto Setyanto²

¹Balai Penelitian Tanah

²Balai Penelitian Lingkungan Pertanian

1. PENDAHULUAN

Lahan sawah tidak hanya penting sebagai penghasil barang privat (*private goods*) seperti padi dan palawija yang memberikan keuntungan langsung kepada petani, tetapi juga penghasil barang dan jasa publik (*public goods and services*) sehingga sawah dikenal memiliki multifungsi. Multifungsi lahan sawah antara lain sebagai penopang ketahanan pangan, penyedia lapangan kerja, penjaga kelestarian budaya, pembawa suasana nyaman pedesaan, mengurangi erosi, dan mendaur ulang sumber daya air (Agus, 2006).

Fungsi atau eksternalitas positif (*positive externalities*) lahan sawah adalah sebagai mitigasi atau pengendali banjir, pendaur ulang air, pengendali atau pengontrol erosi, mitigasi peningkatan suhu udara, dan pendaur ulang limbah organik. Walaupun demikian, terdapat beberapa eksternalitas negatif (*negative externalities*) dari lahan sawah, antara lain pengemisi gas metan (CH_4).

Pesatnya pembangunan dan pertambahan jumlah penduduk menyebabkan terjadinya alih guna lahan sawah secara cepat. Lahan sawah merupakan lahan yang banyak mengalami alih guna, terutama di sekitar pusat pembangunan. Pada umumnya, alih guna lahan sawah bersifat tidak dapat balik (*irreversible*) dan dapat mendegradasi kualitas lingkungan. Nishio (1999) menyajikan data yang memperlihatkan peningkatan frekuensi banjir di Tokyo disebabkan oleh pesatnya pembangunan perindustrian dan perumahan pada tahun 1980-an yang mengorbankan lahan sawah. Keadaan yang sama juga terjadi di Indonesia, terutama pada daerah perkotaan. Banjir lebih sering terjadi di sekitar perkotaan dan ini dapat dihubungkan dengan makin meluasnya alih guna lahan pertanian, termasuk lahan sawah.

Makalah ini membahas berbagai aspek lingkungan lahan sawah, yaitu (i) kontribusi positif atau eksternalitas positif atau lebih dikenal dengan multifungsi lahan sawah terhadap pengamanan kualitas lingkungan dan (ii) pengaruh negatif atau eksternalitas negatif lahan sawah terhadap lingkungan, terutama yang berkenaan dengan emisi gas rumah kaca (GRK) yang dihasilkan oleh lahan sawah.

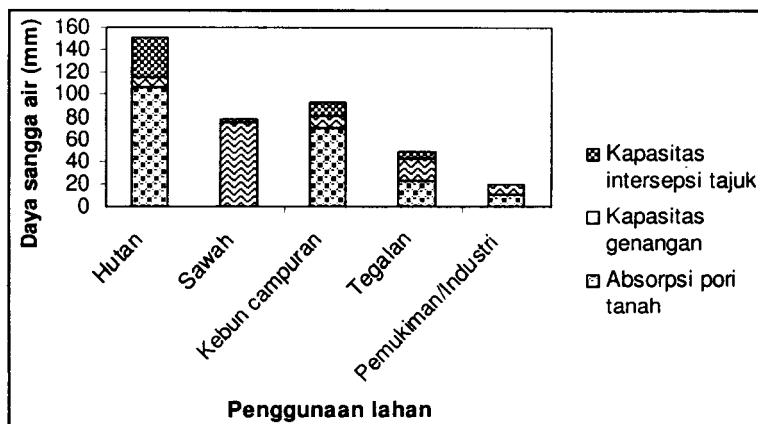
2. MULTIFUNGSI LAHAN SAWAH

Multifungsi lahan sawah adalah fungsi lahan sawah selain sebagai penghasil bahan pangan (beras) sekaligus sebagai penghasil jasa lingkungan, penyangga ekonomi, ketahanan pangan, perekat nilai sosial dan budaya, serta penghasil daya tarik pedesaan. Dalam sistem pasar dan kebijakan yang ada sekarang, nilai jasa-jasa tersebut jarang diperhitungkan (diberlakukan sebagai eksternalitas dalam sistem produksi) karena pada umumnya bersifat tidak nyata (*intangible*) dan sulit dinilai secara ekonomi. Eksternalitas positif atau multifungsi yang dapat disumbangkan oleh lahan sawah antara lain adalah: (a) mitigasi banjir, (b) pengendali erosi dan sedimentasi, (c) mitigasi peningkatan suhu udara, (d) pendaur ulang sumber daya air, (e) penampung limbah organik, dan (f) pereduksi nitrat pada air tanah.

2.1 Mitigasi Banjir

Lahan sawah mempunyai kemampuan untuk menahan/menampung air hujan dan air aliran permukaan, menurunkan volume aliran permukaan, dan oleh sebab itu menekan intensitas dan frekuensi banjir di daerah hilir. Mitigasi banjir dapat diukur dengan menggunakan kriteria daya sangga air (*water retaining capacity*) dari lahan sawah. Lahan sawah yang dikelilingi pematang dapat dipandang sebagai kumpulan ribuan dam kecil atau kolam penahan air (*water retention ponds*) yang berguna untuk memitigasi banjir. Air yang ditampung tersebut dialirkan atau dirembeskan secara perlahan ke badan-badan sungai di daerah hilir sehingga bahaya banjir dapat dikurangi.

Daya sangga air lahan pertanian berbeda-beda tergantung pada berbagai faktor, antara lain porositas tanah, kedalaman perakaran tanaman, kekasaran permukaan tanah, dan daya tahan tajuk tanaman terhadap hujan. Daya sangga air dari petakan sawah sangat ditentukan oleh tinggi pematang dan tinggi genangan. Semakin tinggi pematang dan semakin rendah genangan maka semakin besar daya sangga air dari lahan sawah atau semakin tinggi daya tampung sawah terhadap tambahan air. Hasil penelitian (Nishio, 1999) di Jepang menunjukkan bahwa daya sangga air lahan sawah dengan rata-rata tinggi pematang sekitar 20 cm dan tinggi genangan normal 5 cm adalah 150 mm. Daya sangga air lahan sawah tersebut jauh lebih tinggi dibandingkan daya sangga air lahan kering tanaman pangan yang hanya 40 mm dan daya sangga air kebun campuran setinggi 110 mm; tetapi lebih rendah dibandingkan daya sangga air areal hutan yang besarnya 180 mm. Daya sangga air pada lahan pemukiman dan penggunaan lahan lainnya, seperti kawasan industri dan badan jalan, sangat rendah.



Gambar 1. Daya sangga air lahan sawah dan beberapa tipe penggunaan lahan lainnya di sub DAS Citarik

Hasil penelitian di DAS Citarik, Jawa Barat, (Tala'ohu, 2001) menunjukkan bahwa daya sangga air lahan sawah sekitar 78 mm. Nilai daya sangga air lahan sawah ini sedikit lebih rendah daripada daya sangga air kebun campuran sebesar 92 mm, tetapi jauh lebih tinggi daripada daya sangga air tegalan 48 mm dan areal permukiman 20 mm (Gambar 1). Rendahnya daya sangga air lahan sawah di Indonesia dibandingkan dengan di Jepang disebabkan ketinggian pematang sawah. Di Indonesia umumnya rendah, hanya sekitar 128 mm. Angka ini jauh lebih rendah daripada tinggi pematang sawah di Jepang yang setinggi 200 mm.

Dibandingkan dengan penggunaan lahan lainnya, komponen terbesar daya sangga air lahan sawah adalah karena kapasitas genangan yang tinggi, sedangkan intersepsi kanopi dan daya absorpsi pori tanah terhadap air sangat rendah.

Daya sangga air suatu DAS dapat dihitung sebagai perkalian dari daya sangga air masing-masing penggunaan lahan yang ada di dalam DAS dikalikan dengan luas lahan untuk masing-masing penggunaan lahan tersebut. Semakin menyempit areal pertanian, termasuk lahan sawah, dan semakin luas daerah permukiman dan industri maka semakin kecil daya sangga air DAS tersebut.

2.2 Pengendalian Erosi dan Sedimentasi

Sawah merupakan teknik penggunaan lahan yang mempunyai potensi erosi sangat kecil. Teras lahan sawah dengan pematangnya sangat efektif menekan erosi. Sebaliknya, usaha tani tanaman pangan pada lahan kering berupa rotasi tanaman padi ladang dan palawija, seperti jagung, kacang tanah, kedelai, dan ubi kayu atau usaha tani tanaman sayuran pada lahan kering berlereng curam mempunyai potensi erosi paling tinggi. Hal ini disebabkan sistem usaha tani

Tabel 1. Erosi tanah pada berbagai penggunaan lahan di DAS Citarum, Jawa Barat

Penggunaan lahan	Daerah aliran sungai		
	Saguling	Cirata t/ha/tahun	Jatiluhur
Hutan	0,1	0,2	0,1
Perkebunan teh	23,0	27,0	10,0
Perkebunan karet	-	9,0	11,0
Sawah	0,3	0,4	1,4
Belukar	1,1	1,6	0,5
Lahan kering tanaman pangan	22,0	61,0	40,0

Sumber: Sutono dkk., 2003

tersebut tidak mampu melindungi tanah sepanjang tahun. Sebaliknya, erosi tanah pada lahan sawah dan lahan hutan sangat rendah. Vegetasi yang rapat dengan multistrata pada lahan hutan mampu menekan erosi tanah dengan baik.

Kundarto dkk. (2003) berdasarkan penelitian di Ungaran, Jawa Tengah pada 18 petak sawah dengan ukuran masing-masing berkisar antara 12–360 m², luas total petak 2.515 m², serta kemiringan makro teras sawah sekitar 22% mengemukakan bahwa sedimentasi yang keluar dari petakan sawah tersebut hanya 0,8 t–1,4 t/ha/musim tanam (Tabel 2). Pada sisi lain, sedimen yang berasal dari air irigasi dan memasuki lahan sawah tersebut sebanyak 3,4 t–6,2 t/ha/musim. Sebagian besar sedimen tersebut (2,0 t/ha pada musim pertama dan 5,4 t/ha pada musim kedua) mengendap pada petakan sawah. Selain fenomena kecilnya erosi dan besarnya deposisi pada teras sawah, Tabel 2 juga menunjukkan bahwa erosi tanah dalam jumlah yang agak besar, hanya terjadi pada saat pengolahan tanah. Sedimen yang terangkut dari satu petak, sebagian besar akan mengendap pada beberapa petak sawah di bawahnya (seperti diperlihatkan juga pada Gambar 2). Erosi total yang keluar dari hamparan lahan sawah relatif kecil, yakni sekitar 2,2 t/ha/tahun (dalam dua musim tanam). Data ini menunjukkan bahwa sedimen yang mengendap (*deposited sediment*) di petakan lahan sawah jauh lebih besar dibandingkan dengan sedimen yang keluar (*sediment yield*) dari 18 petakan tersebut. Dengan kata lain, sawah pada lahan berlereng dapat dianggap sebagai sistem penyaring (*filter system*) sedimen. Sebagai pembanding, sedimen yang terangkut dari tegalan pada lokasi yang berdekatan dan dengan pengaruh iklim dan lereng makro yang serupa adalah sekitar 10 t–20 t/ha/tahun (Agus dkk., 2006).

2.3 Mitigasi Peningkatan Suhu Udara

Suhu udara suatu wilayah yang didominasi oleh hamparan lahan sawah yang luas lebih sejuk dibandingkan dengan wilayah yang didominasi oleh areal permukiman. Hal ini karena untuk penguapan air dari permukaan sawah diperlukan energi yang diambil dari panas air dan lahan di sekitar sawah tersebut.

Tabel 2. Erosi tanah pada 18 petak lahan sawah selama dua musim tanam padi

Pengamatan	Musim tanam	
	Pertama	Kedua
	1 Nov'01–31 Jan'02	16 Maret–30 Juni 02
Total sedimen yang masuk ke petakan sawah melalui air irigasi	864 kg (3,4)	1.567 kg (6,2)
Total sedimen yang keluar dari petakan sawah	347 kg (1,4)	210 kg (0,8)
Sedimen yang mengendap (terdeposisi) pada petakan	517 kg (2,0)	1.357 kg (5,4)
Sedimen yang terangkut keluar petakan saat pengolahan tanah	181 kg (0,7)	165 kg (0,6)

Sumber: Kundarto dkk., 2003



Gambar 2. Teras sawah yang berfungsi sebagai kumpulan dam kecil mengumpulkan air dan merupakan filter sedimen. Sedimentasi yang tinggi hanya terjadi pada saat pengolahan tanah dan beberapa saat sesudahnya pada petak dilakukan pengolahan tanah dan beberapa petak di bawahnya

Pengukuran suhu udara menunjukkan bahwa suhu udara di pusat kota ternyata paling tinggi, sedangkan di wilayah sekitar kebun campuran (*agroforestry*) paling sejuk. Suhu udara di wilayah hamparan padi sawah 2°C lebih rendah daripada di pusat perkotaan (Tabel 3).

Penggunaan alat pendingin suhu udara, seperti *air conditioner* (AC) atau kipas angin oleh penduduk merupakan usaha untuk mengembalikan secara *artificial* fungsi mitigasi peningkatan suhu udara yang diberikan oleh lahan sawah atau sistem *agroforestry* tersebut.

Tabel 3. Suhu udara rata-rata di daerah perkotaan, hamparan lahan sawah, dan sekitar kebun campuran di wilayah DAS Citarum, Jawa Barat

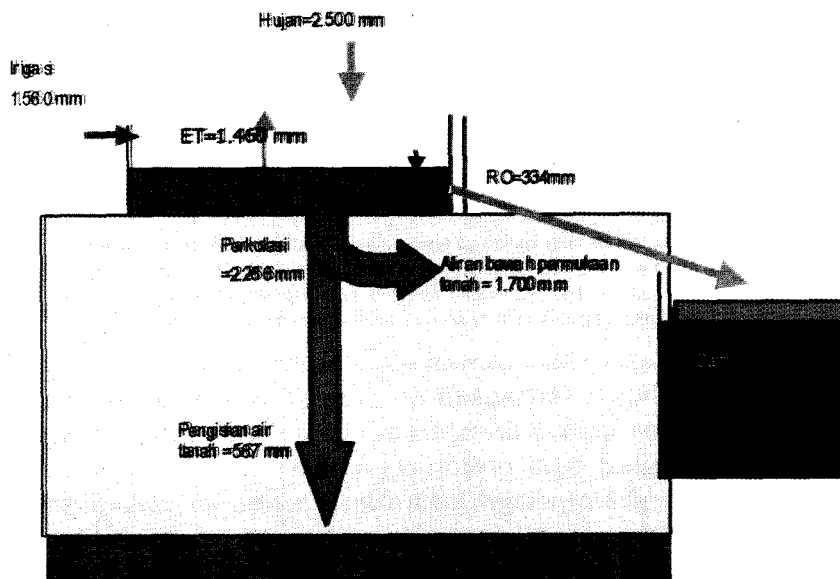
Wilayah kota	Suhu udara (°C) (pukul 11:00 sampai 15:00 WIB)		
	Perkotaan	Lahan sawah	Kebun campuran
Bandung	34	32	na
Cianjur	34	31	28,5
Purwakarta	35	34	29,5

na : data tidak tersedia

2.4 Pendaaur Ulang Sumber Daya Air

Berdasarkan konsep neraca air sebagaimana disajikan dalam Gambar 3 dan Tabel 4, lahan sawah menerima air dari curah hujan dan irigasi. Air tersebut kemudian berubah menjadi air aliran permukaan, menguap melalui proses evaporasi dan transpirasi, serta merembes (perkolasi) ke dalam tanah.

Fagi dan Sanusi (1983) mengestimasi partisi komponen air hujan dan air irigasi yang diterima lahan sawah. Sementara itu, Watung dkk. (2003) mengkalkulasi partisi tersebut untuk lahan sawah di DAS Citarum. Dari jumlah total pasokan air ke lahan sawah sebesar 4.060 mm/tahun yang berasal dari air



Gambar 3. Skema neraca air tahunan pada lahan sawah (Fagi dan Sanusi, 1983) dan estimasi komponen neraca air untuk DAS Citarum, Jawa Barat (Watung dkk., 2003)

Tabel 4. Estimasi Neraca Air Tahunan pada Lahan Sawah Beririgasi di DAS Citarum, Jawa Barat

Deskripsi	Laju (mm/hari)	Lamanya (hari)	Jumlah (mm/tahun)
Pasokan air:			
Irigasi (selama musim tanam)	13	120	1.560
Curah hujan			2.500
Total sumber air			4.060
Output/keluaran:			
Perkolasi (air rembesan/resapan)	10,3	220	2.266
-Langsung mencapai badan air (75%)			1.700
-Memasok cadangan air tanah (25%)			567
Aliran permukaan (<i>runoff</i>)			334
Evapotranspirasi	4	365	1.460
Total keluaran			4.060

hujan dan air irigasi, 2.034 mm (50%) di antaranya menjadi air rembesan ke samping dan aliran permukaan yang akhirnya akan sampai ke badan-badan air. Dari air yang merembes ke dalam tanah sawah, sekitar 75% di antaranya dapat mengalir sebagai aliran bawah tanah (*subsurface flow*) ke badan air (sungai dan bendungan), sedangkan sebagian lagi (sekitar 25%) akan mengisi ulang (*recharge*) air tanah. Dengan asumsi ini, sekitar 567 mm air perkolasi dapat mengisi air tanah. Air yang menuju *aquiver* dan badan air serta dam dapat didaur ulang untuk berbagai pemanfaatan, baik untuk irigasi maupun keperluan rumah tangga.

2.5 Penampung dan Pendaaur Limbah Organik

Sampah organik yang berasal dari luar pertanian, baik bahan organik segar maupun bahan organik yang sudah menjadi kompos, mudah terdekomposisi. Sawah yang luas di pedesaan mempunyai potensi besar untuk menampung/ mendaurlang limbah organik. Sebaliknya, di perkotaan, pembuangan sampah merupakan masalah besar. Masalah penumpukan sampah organik di perkotaan selain memerlukan biaya tinggi, juga mencemari lingkungan sekitar tempat pembuangan akhir (TPA) karena terjadinya penumpukan sampah. Sampah organik yang dikembalikan ke lahan pertanian, termasuk sawah, dapat menyumbang unsur hara bagi lahan sawah sehingga kesuburan tanah sawah meningkat. Pemanfaatan fungsi lahan sawah sebagai penampung limbah organik akan dapat direalisasikan apabila sudah dikembangkan budaya pemilahan sampah organik yang mudah terdekomposisi (*biodegradable*) dari sampah organik tahan urai (*non-biodegradable*) atau sampah nonorganik.

2.6 Pereduksi Kadar Nitrat Air Tanah

Nitrat (NO_3^-) merupakan salah satu bentuk unsur nitrogen yang tersedia di dalam tanah dan bersifat sangat dinamis. Nitrat cepat tercuci ke dalam tanah, terutama pada tanah-tanah yang mempunyai banyak pori drainase atau tanah yang gembur. Pada lingkungan sawah, mineralisasi nitrogen cenderung menghasilkan amonium (NH_4^+), sedangkan kadar nitratnya relatif rendah. Selain itu, tanah sawah umumnya mempunyai lapisan tapak bajak yang kedap air sehingga pencucian nitrat ke sumur-sumur di sekitar persawahan relatif lebih rendah dibandingkan dengan pencucian nitrat ke sumur-sumur di sekitar lahan kering.

Hasil penelitian Nursyamsi dkk. (2001) menunjukkan bahwa kadar NO_3^- pada air sumur yang berada di lingkungan lahan kering sudah melebihi baku mutu lingkungan (BML) yang direkomendasikan oleh *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), yakni maksimum 10 mg NO_3^-/l (CAST, 1985) (Tabel 5). Untuk DAS Citarik, nilai tengah konsentrasi nitrat pada air sumur di sekitar tegalan adalah 10,3 mg/l dan standar deviasinya lebih besar daripada nilai tengah. Data ini mempunyai makna bahwa variasi kadar nitrat pada air tanah sangat besar dan cukup banyak sumur atau air tanah yang kadar nitratnya jauh di atas nilai ambang batas.

Untuk lokasi studi di DAS Kaligarang, nilai tengah dan standar deviasi air sumur di sekitar lahan tegalan jauh lebih tinggi. Data ini menunjukkan bahwa hanya sedikit sumur di sekitar tegalan di DAS ini yang kadar nitratnya di bawah ambang batas. Air minum yang mengandung nitrat di atas BML sangat berbahaya karena dapat menyebabkan penyakit bayi biru (*blue baby disease*) (Saeni, 1989 dan Flether, 1991).

Tabel 5. Kadar nitrat, amonium, dan sulfat air tanah (air sumur) serta standar deviasinya di sekitar lahan pertanian di sub - DAS Citarik dan DAS Kaligarang.

DAS dan penggunaan lahan	Nitrat	Amonium mg/l	Sulfat
Sub-DAS Citarik:			
Sawah	4,6 ± 4,5	3,2 ± 5,8	17,6 ± 17,9
Tegalan	10,3 ± 12,4	0,2 ± 0,3	8,4 ± 10,3
Kebun campuran	7,8 ± 10,9	0,0 ± 0,1	1,5 ± 1,8
Hutan	0,9 ± 0,4	0,2 ± 0,3	1,0 ± 1,4
Sungai	2,5 ± 2,4	1,1 ± 1,7	42,9 ± 82,3
DAS Kaligarang:			
Sawah	1,1 ± 1,4	0,5 ± 0,5	8,9 ± 15,1
Tegalan	26,5 ± 26,8	0,1 ± 0,1	5,2 ± 4,6
Kebun campuran	8,1 ± 5,6	0,1 ± 0,1	2,0 ± 2,0
Hutan	0,9 ± 0,0	0,0 ± 0,0	1,3 ± 0,0
Sungai	3,9 ± 1,4	0,2 ± 0,3	3,5 ± 3,2

Sumber: Nursyamsi dkk., 2001

Kadar nitrat pada air sumur di sekitar persawahan relatif rendah (berada di bawah nilai ambang batas). Padahal, para petani menggunakan pupuk urea sebagai sumber nitrogen pada lahan sawah intensifikasi dengan takaran yang jauh lebih tinggi daripada 200 kg urea/ha/musim tanam dibandingkan dengan takaran pupuk urea pada lahan kering tanaman pangan yang mencapai 100 kg/ha/ musim tanam (Adiningsih dkk., 1997). Fakta tersebut menunjukkan bahwa lahan sawah mengurangi konsentrasi nitrat pada air tanah.

2.7 Detoksifikasi Kelebihan Unsur Hara

Nitrogen dan fosfor merupakan dua unsur utama yang menjadi penyebab pendangkalan badan-badan air melalui proses eutrofikasi. Dewasa ini pertanian dipandang sebagai aktivitas yang menjadi penyebab utama eutrofikasi karena petani cenderung menggunakan pupuk N dan P yang berlebihan untuk memperoleh hasil padi yang baik.

Namun, sesungguhnya lahan sawah mempunyai mekanisme intrinsik untuk menetralkan unsur N dan P yang berlebihan selama musim tanam. Unsur N dalam bentuk amoniak (NH_3) yang berasal dari hasil dekomposisi bahan organik atau penambahan pupuk N (urea atau ZA) akan stabil pada tanah dalam keadaan tereduksi. Kemudian, pada saat amoniak teroksidasi, unsur N akan berubah dari bentuk amoniak menjadi nitrat yang sebagian mudah tercuci ke lapisan reduksi dan hilang ke udara melalui proses denitrifikasi.

Kemampuan lahan sawah dalam mentransformasi dan denitrifikasi unsur N tersebut sangat nyata berbeda dengan lahan kering. Pada lahan kering, unsur nitrogen-nitrat akan menjadi sumber pencemar utama bagi tanah dan air permukaan (Tabel 5).

Unsur P akan stabil tersimpan di dalam tanah sawah karena terikat oleh partikel tanah, khususnya dalam lapisan *sub-soil* yang teroksidasi sehingga tidak mudah tercuci.

2.8 Detoksifikasi Bahan Kimia Pertanian

Zat-zat kimia hidrokarbon berklorine seperti lindin (BHC), *dichlorodiphenyl-trichloroetane* (DDT), dan *pentachlorophenol* (PCP) yang sudah lama dilarang untuk digunakan di sektor pertanian, lebih cepat terdekomposisi pada lahan sawah yang tergenang dibandingkan pada lahan kering (Sethunathan dan Siddaramappa, 1978 dalam Kyuma, 2004). Hal ini mungkin disebabkan proses deklorinasi (pelepasan klorin) dan dehidroklorinasi dalam keadaan reduksi. Diazinon dan parathion menjadi tidak aktif dalam keadaan terhidrolisis. Demikian juga nitrofen (NIP) dan chlornitrofen (CNP) secara cepat

menjadi tidak aktif pada lahan sawah karena proses transformasi reduksi nitrogen dari grup nitrat menjadi grup amino. Dengan demikian, lahan sawah mampu menetralkan sifat racun beberapa unsur kimia sebelum berpengaruh terhadap tempat-tempat lain di hilir sawah.

Walaupun demikian, beberapa bahan kimia pertanian, seperti fenthion (*Dimethyl methylthiotolyl phosphorothioate*, DMTP dan *Mercaptophos*, MPP) dan fenobucarb (*carbamate*), mempunyai paruh waktu (*half life*, $T_{1/2}$) yang lebih panjang pada lahan sawah dibandingkan di lahan kering. Untuk bahan agrokimia lain, pada umumnya, masa paruh waktunya di lahan sawah lebih pendek.

2.9 Penambatan Karbon

Bahan organik cenderung terakumulasi lebih banyak pada lahan sawah daripada pada lahan kering. Dikaitkan dengan masalah pemanasan global, fakta tersebut dapat dipandang sebagai kemampuan alami lahan sawah dalam menambat karbon. Kadar C-organik pada lahan sawah biasanya beberapa kali lebih tinggi dibandingkan dengan kadar C-organik lahan kering (Mitsuchi, 1971 dalam Kyuma, 2004). Walaupun kecenderungan ini tidak dapat digeneralisasi, fakta ilmiah yang dapat diyakini adalah kondisi genangan (anaerobik) pada lahan sawah dapat membantu tanah sawah menambat karbon lebih banyak daripada lahan kering.

2.10 Polusi Air

Walaupun ada mekanisme detoksifikasi pada lahan sawah, residu agrokimia dan asam-asam organik dapat memasuki saluran drainase dan mengalir ke badan air seperti sungai, kolam, dan danau. Proses pengangkutan zat agrokimia ini terutama terjadi pada musim penanaman dan pemupukan.

Selain itu, sewaktu proses pengolahan tanah, tanah sawah bisa menjadi sumber lumpur. Namun, jumlah total lumpur (sedimen) yang keluar dari lahan sawah, seperti yang tercantum pada Tabel 2, relatif kecil dibandingkan dengan yang berasal dari lahan kering (tegalan).

2.11 Konsumsi Air yang Tinggi

Air merupakan unsur sangat penting pada sistem sawah dan ketersediaan air dalam jumlah tinggi merupakan prasyarat persawahan. Untuk satu musim tanam diperlukan air sebanyak 1.500 mm walaupun tidak semua air ini dimanfaatkan untuk proses pertumbuhan dan evapotranspirasi. Seperti

diilustrasikan pada Gambar 3, sebagian air tersebut mengisi cadangan air tanah (*ground water*), sedangkan sebagiannya lagi merembes kembali ke badan air. Dengan semakin kompetitifnya pengadaan air, tidak mudah mengadakan air dengan jumlah yang berlimpah tersebut untuk sawah.

3. LAHAN SAWAH DAN PEMANASAN GLOBAL

Hasil pengukuran atmosfer menunjukkan bahwa kadar gas rumah kaca (GRK) di udara terus meningkat seiring dengan aktivitas manusia. GRK menimbulkan fenomena alam yang disebut efek rumah kaca yang berpengaruh terhadap perubahan iklim global (Taylor dan MacCracken, 1990) yang ditandai dengan timbulnya cuaca ekstrim yang dapat menyebabkan penurunan produktivitas tanaman.

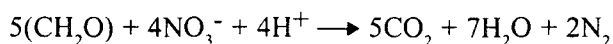
Gas yang dikategorikan dalam GRK adalah karbon dioksida (CO_2), metan (CH_4), dinitrogen oksida (N_2O), *chlorofluorocarbon* (CFC), *hydrofluorocarbon* (HFC), karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x) dan gas-gas organik non-metan yang mudah menguap. Di antara GRK tersebut, CH_4 dan N_2O merupakan GRK utama dari lahan sawah.

3.1 Dinitrogen Oksida

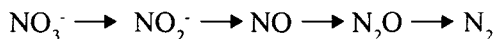
Penelitian gumpalan es di daerah kutub bumi menunjukkan bahwa konsentrasi N_2O sebelum tahun 1700 adalah 285 ppbv (*part per billion volume*) (Stauffer dan Neftel, 1988). Pada abad selanjutnya, konsentrasi N_2O mengalami peningkatan terutama sejak masa perang dunia ke-2, dan pada tahun 1990 konsentrasi N_2O di atmosfer sudah mencapai 310 ppbv.

Secara antropogenik, pembentukan gas dinitrogen oksida dapat terjadi melalui dua cara. Pertama proses biogenik, yaitu satu proses yang melibatkan bakteri seperti denitrifikasi dan nitrifikasi di dalam tanah. Kedua, proses abiogenik yang tidak melibatkan bakteri. Sebagai contoh adalah pembakaran biomasa secara tidak sempurna (*incomplete combustion*).

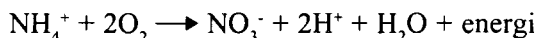
Denitrifikasi adalah proses akhir dari siklus nitrogen dalam tanah, yaitu nitrogen dikembalikan ke siklus N_2 di atmosfer bumi secara anaerobik. Banyak mikroorganisme menggunakan NO_3^- sebagai elektron aseptor utama untuk mendapatkan energi dari bahan organik saat O_2 tersedia dalam jumlah rendah dalam tanah (*heterotropik denititifikasi*). Proses ini digambarkan secara sederhana sebagai berikut:



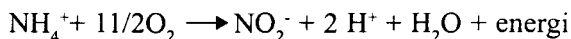
Beberapa mikroorganisme dapat menggunakan energi dengan menggunakan NO_3^- untuk oksidasi senyawa anorganik, seperti S^{2-} dan Fe^{2+} (*autotropik denitrifikasi*). Proses ini terjadi saat NO_3^- terdifusi ke lapisan tanah yang kaya akan FeS (Golterman, 1991). Denitrifikasi secara heterotropik adalah yang paling berperan dalam proses pembentukan N_2O . Secara sederhana proses ini digambarkan sebagai berikut:



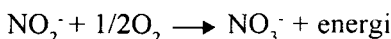
Selain denitrifikasi, proses nitrifikasi juga berperan dalam pembentukan gas N_2O . Nitrifikasi adalah proses penguraian amonium (NH_4^+) menjadi nitrat (NO_3^-) yang terjadi dalam kondisi aerobik. Nitrifikasi melibatkan bakteri autotropik dan heterotropik. Bakteri autotropik menggunakan CO_2 sebagai sumber karbon dan mendapatkan energi melalui oksidasi NH_4^+ yang berasal dari mineralisasi bahan organik tanah atau dari pupuk anorganik yang mengandung nitrogen. Proses mineralisasi NH_4^+ tersebut digambarkan sebagai berikut:



Haynes (1986) menyebutkan bahwa nitrifikasi berlangsung melalui dua proses yang terpisah. Pertama, NH_4^+ teroksidasi menjadi NO_2^- dengan $\text{N H}_2\text{OH}$ sebagai hasil antara. Reaksinya digambarkan sebagai berikut:



Bakteri yang terlibat dalam pembentukan NH_4^+ menjadi NO_2^- dinamakan bakteri pengoksidasi amonium. Dalam tatanan mikrobiologi bakteri jenis ini diberi awalan *Nitroso-*. Spesies yang paling dikenal saat ini adalah *Nitrosomonas*. Tahap kedua dilakukan oleh bakteri pengoksidasi nitrit (dalam tatanan mikrobiologi diawali dengan kata *Nitro-*). Bakteri yang paling dikenal dalam spesies ini adalah *Nitrobacter*. Reaksi tahap kedua adalah sebagai berikut:



Groffman (1991) menyebutkan bahwa mekanisme pembentukan N_2O secara aerobik terjadi melalui dua cara, yaitu (1) penggunaan NO_2^- oleh bakteri pengoksidasi amonium sebagai elektron asektor yang ada pada saat ketersediaan O_2 rendah dapat membentuk gas N_2O sebagai hasil antara. Proses ini dikenal dengan istilah *nitrifier denitrification*, (2) hasil antara (*intermediates*) dari penguraian NH_4^+ dan NO_2^- sendiri secara kimiawi dapat terdekomposisi

Tabel 6. Emisi N_2O dan hasil padi dari berbagai sistem pengelolaan tanaman padi pada musim kemarau 2007. (n = 3, nilai rata-rata $\pm$ SD)

Sistem pengelolaan tanaman padi	Emisi N_2O (g/ha/musim)		Hasil padi (t/ha)	Rasio g N_2O /t hasil padi
Non -PTT tergenang	868	$\pm$ 278	6,72	129,2
Non- PTT <i>intermittent</i>	597	$\pm$ 217	6,49	92,0
PTT tergenang	879	$\pm$ 320	6,76	130,0
PTT <i>intermittent</i>	655	$\pm$ 182	7,10	92,3
SRI <i>intermittent</i>	524	$\pm$ 161	2,41	217,4
Rata-rata	705	$\pm$ 161	5,90	132,2

Sumber: Setyanto dkk., 2007

menjadi N_2O , terutama pada kondisi pH rendah. Proses ini dikenal dengan istilah *chemodenitrification*.

Gas N_2O merupakan gas rumah kaca yang tingkat pemanasan per satu molekulnya setara dengan 200–300 kali tingkat pemanasan yang disebabkan oleh CO_2 . Gas ini juga merupakan salah satu penyebab penciutan lapisan ozon di stratosfir. Walaupun memiliki nilai pemanasan yang hampir 300 kali lebih besar daripada CO_2 , emisi gas N_2O dari lahan sawah relatif rendah; berkisar antara 0,1%–0,6% dari jumlah pemberian pupuk N (urea) dalam tanah (Granli dan Bockman, 1994). Unsur ini lebih mudah dikendalikan melalui efisiensi pemupukan N pada lahan pertanian. Emisi N_2O dari lahan sawah di Jakenan, Jawa Tengah, berkisar antara 0,5–0,9 kg N_2O /ha/musim atau setara dengan 0,3% dari rata-rata urea yang diberikan lahan padi sawah sebanyak 250 kg urea/ha/musim. Besarnya emisi N_2O dari berbagai pengelolaan lahan sawah ditunjukkan pada Tabel 6.

3.2 Metan

Metan (CH_4) merupakan GRK kedua setelah CO_2 dalam kaitannya dengan pemanasan global atau efek rumah kaca. Daya pemanasan global satu molekul gas CH_4 di Troposfir sekitar 21 kali daya pemanasan satu molekul CO_2 . Gas CH_4 akan bertahan di lapisan troposfir sekitar 7–10 tahun.

CH_4 dihasilkan oleh sekelompok bakteri yang menguraikan bahan organik dalam keadaan anaerobik, misalnya pada lahan sawah, rawa, padang rumput, dan hutan yang terbakar. Lahan rawa dan sawah dipercaya merupakan sumber utama CH_4 karena di dalamnya terkandung banyak unsur karbon tanah dan suasananya anaerobik.

Pada skala global konsentrasi CH_4 meningkat sekitar 1% setiap tahun. Konsentrasi CH_4 di udara dewasa ini telah mencapai 1,72 ppm (volume) lebih dua kali lipat dari konsentrasi sebelum praindustri yang hanya 0,8 ppm (volume). Lahan basah, termasuk lahan sawah, menyumbang 15%–45% kadar CH_4 di atmosfer, sedangkan sumbangan lahan kering 3%–10% (Segers dan Kenger, 1997).

Produksi (emisi) dan oksidasi CH_4 pada lahan sawah dipengaruhi oleh berbagai mikroorganisme yang aktivitasnya juga dipengaruhi oleh faktor biologi, fisika, dan kimia tanah sawah. Rizosfir tanaman padi memengaruhi produksi dan oksidasi CH_4 . Selama masa pertumbuhan tanaman, fluktuasi air sawah juga memengaruhi produksi dan oksidasi CH_4 .

Beberapa referensi yang menunjukkan besarnya emisi CH_4 dari lahan sawah di Indonesia disajikan dalam Tabel 7. Beberapa pendekatan digunakan untuk menduga besarnya emisi CH_4 dari lahan sawah. Pendekatan pertama yang digunakan adalah melakukan ekstrapolasi data emisi skala lapangan ke skala global berdasarkan luas areal lahan sawah yang sudah disesuaikan dengan musim tanam padi. Pada pendekatan pertama ini, Mathews dkk. (1991) mendapatkan angka global emisi CH_4 tahunan sebesar 66 juta ton (Mt). Pendekatan kedua adalah menggunakan data *net primary production* (NPP), yaitu produksi bahan organik dari tanaman hidup pada ekosistem daratan yang dapat dikonversikan menjadi CH_4 . Taylor *et al.* (1991) menggunakan asumsi bahwa 5% produksi seluruh biomas dari lahan sawah berubah menjadi CH_4 . Berdasarkan pendekatan tersebut, emisi global CH_4 tahunan diperkirakan mencapai 100 Mt.

Pendekatan ketiga dilakukan dengan menggunakan *process-based crop/soil model MERES (methane emissions from rice ecosystems)* bersama dengan data iklim, spasial tanah, dan statistik pertumbuhan tanaman padi untuk menduga emisi CH_4 tahunan. Mathews *et al.* (2000) memprediksi total emisi

Tabel 7. Perbandingan emisi CH_4 (Mt/tahun) di Cina, India, Indonesia, Filipina, dan Thailand berdasarkan beberapa hasil penelitian. Luas area lahan sawah berasal dari basis data Huke dan Huke, 1997.

Referensi	Cina	India	Indonesia	Filipina	Thailand
Luas lahan sawah (km ²)	321.449	428.545	79.439	25.464	92.366
Emisi CH_4 (Mt/th)					
Mathews <i>et al.</i> (1991)	14,92	21,68	2,90	0,99	4,10
Taylor <i>et al.</i> (1991)	13,46	18,35	4,81	1,14	4,73
Neue <i>et al.</i> (1990)	14,71	14,54	3,54	0,80	2,24
Khalil and Shearer (1993)	23,00	15,30	6,20	1,20	4,70
Cao <i>et al.</i> (1996)	12,30	14,40	4,70	-	2,90
Sass and Fisher (1997)	15,00	4,20	3,50	0,51	4,62
Husin (1994)	-	-	4,00	-	-
Ministry of Environment (1999)	-	-	2,28	-	-

Sumber: Huke dan Huke, 1997

CH₄ dari lahan sawah di Indonesia dengan luas 110.088 km² sebesar 1,0–2,87 Mt per tahun. Luasan areal yang digunakan dalam Mathews *et al.* (2000) berbeda dengan yang digunakan oleh penulis lain pada Tabel 7 karena Mathews menggunakan basis data luas panen padi, peta dari Huke dan Huke (1997), sedangkan penulis lain menggunakan luas baku sawah, peta dari Bachelet dan Neue (1993). Perbedaan luas areal lahan sawah yang dikeluarkan oleh Huke dan Huke (1997) disebabkan oleh pencantuman lahan gambut yang sudah disawahkan dalam peta sebaran lahan sawah. Menurut Mathews dkk. (2000), rendahnya pendugaan emisi gas CH₄ dari tanah gambut di Indonesia disebabkan oleh rata-rata kandungan besinya lebih tinggi dibandingkan gambut di negara lain. Kandungan besi tinggi menyebabkan persaingan antara bakteri pereduksi besi (*Fe-reducing bacteria*) dan bakteri metanogenik (*methanogenic bacteria*) dalam mendapatkan substrat karbon tersedia sehingga emisi CH₄ dari tanah gambut di Indonesia dianggap rendah.

Emisi CH₄ dari lahan sawah dengan berbagai varietas padi utama di Indonesia telah diukur oleh Setyanto dkk. (2007) selama dua musim tanam, yaitu pada MK 2001 dan MK 2003 dengan hasil seperti dalam Tabel 8.

Perkiraan besarnya emisi GRK dari lahan sawah di Indonesia selama tahun 2003–2006 ditunjukkan pada Tabel 9. Rasio antara produksi dan emisi pada Tabel 7 dan 8 digunakan untuk menghitung total emisi GRK dari lahan sawah di Indonesia. Rasio emisi/produksi padi digunakan sebagai pendekatan karena berbagai hasil kajian menunjukkan hubungan yang nyata antara produktivitas tanaman dan total emisi GRK dari lahan sawah (Setyanto, 2004). Produktivitas tanaman padi selain dipengaruhi oleh faktor internal tanah (sifat fisik dan kimia tanah), juga dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti pemupukan, pengairan, penambahan bahan organik, dan cara pengelolaan lahan. Faktor eksternal tersebut berpengaruh nyata terhadap besarnya emisi GRK dari lahan sawah.

Berdasarkan produktivitas lahan, emisi CH₄ dari lahan sawah di Indonesia diperkirakan mencapai 0,83 Mt pada tahun 2006. Total emisi tersebut meningkat sebesar 4,4% dibandingkan emisi tahun 2003. Hal yang menarik dari perhitungan

Tabel 8. Emisi CH₄ dan rasio kg hasil padi/kg emisi CH₄ dari varietas padi utama di Indonesia

Varietas padi utama	Emisi CH ₄ (kg/ha)		Hasil padi (ton/ha)		Rasio kg CH ₄ /t gabah		Rasio rata-rata
	tahun 2001	tahun 2003	tahun 2001	tahun 2002	tahun 2001	tahun 2003	
Cisadane	107	124	5,76	6,43	18,5	19,3	18,9
Memberamo	83	106	5,88	7,40	14,1	14,3	14,2
Way Apo Buru	83	106	6,07	7,40	13,7	14,3	14,0
IR64	79	101	5,87	6,74	13,4	15,0	14,2

Sumber: Setyanto dkk., 2004

Tabel 9. Emisi gas rumah kaca dalam satuan CO₂ ekivalen (CO₂eq) dari lahan sawah di Indonesia selama periode 2003–2006

Tahun	Luas panen (ha) ¹	Produksi rata-rata ¹	Produksi nasional ¹	Total emisi ² CH ₄	Total emisi N ₂ O ³	CO ₂ eq ⁴
		t/ha	t	t	t	*Mt
2003	1.488.034	4,538	52.137.604	798.748	6.891	18,8
2004	11.922.974	4,536	54.088.468	828.635	7.149	19,5
2005	11.839.060	4,574	54.151.097	829.595	7.157	19,6
2006	11.786.430	4,620	54.454.937	834.250	7.197	19,7

1. Sumber: Biro Pusat Statistik (<http://www.bps.go.id>)

2. Emisi CH₄ dihitung berdasarkan data produksi padi nasional x rasio kg CH₄/t produksi padi pada Tabel 8.

3. Emisi N₂O dihitung berdasarkan data produksi padi nasional x rasio g N₂O / t produksi padi pada Tabel 6.

4. CO₂-eq diperoleh dari konversi berdasarkan nilai global warming potential (GWP) menurut IPCC (2001). Nilai GWP CH₄ = 21 x CO₂, dan N₂O = 296 x CO₂

Mt (mega ton) = juta ton

tersebut adalah emisi CH₄ dari lahan sawah di Indonesia relatif lebih rendah dibandingkan dengan pendugaan peneliti lain seperti yang tercantum pada Tabel 7. Pendugaan yang mendekati perhitungan pada Tabel 9 adalah yang dilakukan oleh Mathews *et al.* (2000) dengan perkiraan emisi 1,0–2,87 Mt/ tahun. Setelah dikompilasi dengan data emisi N₂O lalu nilainya disetarakan dengan nilai CO₂ (CO₂eq), emisi GRK lahan sawah di Indonesia pada tahun 2006 diperkirakan 19,7 Mt CO₂eq. Nilai ini relatif lebih rendah daripada dugaan total emisi setara CO₂ dari lahan sawah yang disampaikan Husin (1994) dan Kementerian Negara Lingkungan Hidup (1999) yang berturut-turut mencapai 84 Mt dan 47,8 Mt CO₂eq per tahun. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan tidak diperhitungkannya emisi CH₄ dari sawah pada lahan gambut. Luas sawah lahan gambut, termasuk sawah pasang surut, diperkirakan sekitar 900.000 ha dan pada umumnya tersebar di Kalimantan dan Sumatera (Alihamsyah, 2006).

Apabila dari Tabel 9 diasumsikan bahwa emisi GRK rata-rata dari tanah sawah adalah 20 Mt CO₂eq per tahun, jumlah ini setara dengan 5,2% total emisi GRK Indonesia menurut UNDP (2004) sebesar 378 Mt CO₂eq per tahun atau hanya 0,6% dari total emisi GRK Indonesia menurut perkiraan Hooijer *et al.* (2006) sebesar 3000 Mt CO₂eq. Dengan demikian, jumlah ini tidak cukup signifikan dibandingkan total emisi global.

4. ANCAMAN TERHADAP KUALITAS LINGKUNGAN LAHAN SAWAH

Di samping ancaman alih guna, lahan sawah juga dapat menurun kualitasnya akibat terkontaminasi berbagai limbah dari kawasan permukiman dan industri yang berada di sekitar areal persawahan. Ada indikasi yang kuat bahwa bahan

pewarna dan logam berat yang berasal dari pabrik tekstil mencemari lingkungan persawahan yang berdekatan dengan pabrik. Wawancara dengan penduduk di sub-DAS Citarik, Kabupaten Bandung, Jawa Barat, mengungkapkan bahwa beberapa jenis ikan yang dulunya banyak terdapat di sungai Citarik, sekarang tidak ditemukan lagi. Hal ini dipercaya merupakan dampak dari pencemaran air oleh limbah industri.

Suganda dkk. (2003) meneliti luas lahan sawah yang sudah tercemar serta kadar logam berat di dalam tanah dan jaringan tanaman. Contoh tanah dan air diambil dari lokasi dekat pabrik tekstil sampai jarak 2 km ke arah hilir, serta dari sebelah kanan dan kiri sungai pada jarak 0,5 km.

Petani setempat menyatakan bahwa warna air sungai dan air sawah yang berdekatan dengan pabrik sering berubah dari jernih menjadi kehitam-hitaman atau kemerah-merahan. Analisis kimia menunjukkan bahwa kadar Cu, Zn, dan Co pada tanah sawah di sekitar pabrik tekstil di Citarik sudah mencapai titik kritis atau batas maksimum lingkungan (BML) (Tabel 10). Namun, kadar logam berat pada contoh tanaman masih lebih rendah daripada BML, kecuali untuk kadar Zn yang telah melewati ambang batas tidak aman bagi konsumsi manusia dan ternak (Tabel 11).

Mengingat adanya indikasi meningkatnya kadar logam berat, diperlukan upaya deliniasi lahan sawah di sekitar pabrik berdasarkan tingkat pencemarannya. Sawah yang tanahnya mengandung logam berat di atas BML akan mengancam keamanan pangan (*food safety*) dan karena itu diperlukan langkah-langkah kebijakan untuk penanganannya, seperti penggunaan lahan untuk pertanian nonpangan (tanaman hias atau serat), dan pemberian kompensasi bagi petani yang tanah sawahnya tercemar.

5. PENUTUP

Lahan sawah mempunyai arti penting karena menyumbangkan berbagai jasa lingkungan (mempunyai multifungsi) dalam bentuk mitigasi banjir, pengendalian erosi dan sedimentasi, pendaur ulang sumber daya air, mitigasi peningkatan suhu udara, penampung atau pendaur ulang limbah organik, pengurang kadar nitrat pada air tanah, detoksifikasi kelebihan unsur hara dan residu pestisida sehingga tidak mencemari lingkungan, serta penambat karbon.

Walaupun mempunyai banyak aspek positif, lahan sawah ditengarai sebagai penyumbang emisi gas rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global. Akan tetapi, pengaruh negatif ini relatif kecil. Emisi gas rumah kaca dari lahan sawah hanya sekitar 20 Mt CO₂eq per tahun; tidak *significant* dibandingkan dengan emisi gas rumah kaca total sebanyak 378 Mt CO₂eq menurut UNDP (2004) atau 3000 Mt CO₂eq per tahun menurut Hooijer *et al.* (2006). Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa emisi gas rumah kaca dari lahan sawah relatif kecil.

Tabel 10. Kadar logam berat pada tanah sawah di sekitar pabrik tekstil di Rancaekek, Kabupaten Bandung, Jawa Barat

Logam berat	Kadar (kisaran) mg/kg		Batas maksimum pada tanah
	Minimum	Maksimum	
Cu	43	83	60–125
Zn	57	137	70–400
Pb	8	23	100–400
Cd	0,05	0,19	3–8
Co	14	27	25–50
Cr	0,8	25	75–100
Ni	14	21	-

Sumber: Suganda dkk., 2003

Tabel 11. Kisaran kadar logam berat pada jerami padi dan beras yang berasal dari sawah di sekitar pabrik tekstil di Rancaekek, Kabupaten Bandung, Jawa Barat

Logam berat	Kadar (kisaran) mg/kg		BML pada tanaman
	Jerami	Beras	
Cu	2–13	2–7	20–100
Zn	17–64	14–23	10–400
Pb	0,971–5,384	0,092–0,918	50–300
Cd	0,029–0,351	0,026–0,180	5–30
Co	0,108–5,917	0,111–4,157	15–30
Cr	0,673–4,521	0,985–17,110	-
Ni	0,437–15,864	0,609–43,072	5–30

Sumber: Suganda dkk., 2003

DAFTAR PUSTAKA

- Adiningsih, J.S., *et al.* 1997. "Development of Integrated Fertilizer Management to Sustain Food Crop Production in Indonesia: The Use of Organic and Biofertilizers". *Indonesian Agric. Reserach and Dev. Journal* 19: 57–66.
- Agus, F. (Ed.). 2006. *Final Report, Country Case Studies on Multifunctionality of Agriculture in ASEAN Countries*. Jakarta: ASEAN Secretariat and Ministry of Agriculture, Fisheries and Forestry of Japan.
- Agus, F., *et al.* 2006. "Environmental Multifunctionality of Indonesian Agriculture". *Paddy Water Environment*, 4:181–188.
- Alihamsyah, T. 2006. "Pengelolaan Lahan Gambut. Banjar Baru: Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa".
- Bachelet, D. and Neue, H.U. 1993. "Methane Emissions from Wetland Rice Areas of Asia". *Chemosphere*, 26 (1–4): 219–237.

- Biro Pusat Statistik. 2007. (<http://www.bps.go.id/sector/agri/pangan/table3.shtml>).
- Cao, M. Gregson, *et al.* 1996. "Global Methane Emissions from Rice Paddies". *Chemosphere*, 55 (5): 879–897.
- Fagi, A.M. dan S.A. Sanusi. 1983. "Meningkatkan Efisiensi Air Irigasi dengan Teknik Budidaya Tanaman dan Teknik Pengairan". Kumpulan makalah Lokakarya Penelitian Padi. Cibogo, Bogor 22–24 Maret 1983. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Bogor.
- Fletcher, D. 1991. "A. National Perspective". Follet, *et al.* (Ed.), *Managing Nitrogen for Ground Water Quality and Farm Profitability*. pp. 9–17. In R.F. Soil Science Soc. of America, Madison, Wisconsin.
- Granli, T. dan Bockman, O.C. 1994. "Nitrous Oxide from Agriculture". *Norwegian Journal of Agricultural Sciences*. Norsk Hydro Research Center, Porsgrunn, Norway. Supplement No. 12, P: 50–51.
- Groffman, PM. 1991. Ecology of nitrification and denitrification in soil evaluated at scales relevant to atmospheric chemistry. Hal. 201–217 dalam J.E. Rogers dan W.B. Whitman (eds.) *Microbial production and consumption of greenhouse gases: Methane, nitrogen oxides and halomethanes*. American Society for Microbiology, Washington D.C.
- Haynes R.J. dan F.L. Orlando (Ed.), *Mineral Nitrogen in Plant Soil System*. New York: Academic Press.
- Hooijer, A., *et al.* 2006. "Peat CO₂, Assessment of CO₂ Emission from Drained Peatlands in SE Asia". Delft Hydraulics report Q3943 (2006).
- Huke, R.E. dan Huke E.H. 1997. "Rice Area by Type of Culture: South, Southeast and East Asia". A Revised and Updated Database. International Rice Research Institute, Manila, Philippines. 59 p.
- Husin, Y.A. 1994. "Methane Flux from Indonesian Wetland Rice: the Effects of Water Management and Rice Variety". PhD Thesis, Bogor: Agricultural University. P: 121–135.
- Khalil, M.A.K. dan Shearer, M.J. 1993. "Methane Emission from Rice Agriculture". Cited in Shearer M.J., *et al.* (Ed.), *Rice Agriculture: Emissions*. In *Atmospheric Methane: Sources, Sinks, and Role in Global Change*, Berlin, Springer-Verlag 113: 250–253.
- Kundarto, M., dkk. 2003. "Neraca Air, Erosi Tanah, dan Transpor Lateral Hara NPK pada Sistem Persawahan di Sub DAS Kali Babon, Semarang". *Prosiding Seminar Nasional Multifungsi dan Konversi Lahan Pertanian*. Bogor, 2 Oktober dan Jakarta, 25 Oktober 2002. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Kyuma, K. 2004. *Paddy Soil Science*. Jepang: Kyoto University Press and Trans Pacific Press.

- Mathews E, *et al.* 1991. "Methane Emission from Rice Cultivation: Geographic and Seasonal Distribution of Cultivated Areas and Emissions". *Global Biogeochem Cycles*, 5:3–24.
- Mathews, *et al.* 2000. "Using a Crop/Soil Simulation Model and GIS Techniques to Assess Methane Emissions from Rice Fields in Asia". IV. Upscaling to National Levels. *Nutrient Cycle in Agroecosyst* 58: 201–217.
- Ministry of Environment. 1999. *Indonesia: The First National Communication Under the United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- Neue, *et al.* 1990. "Organic Matter Dynamics, Soil Properties and Cultural Practices in Rice Lands and Their Relationship to Methane Production". In A.F. Bouwman (Ed.), *Soils and Greenhouse Effect*, pp 457–466, Wiley, New York.
- Nishio, M. 1999. "Multifunction Character of Paddy Farming". Second Group Meeting on the Interchange of Agricultural Technology Information between ASEAN Member Countries and Japan, 16–18 February, 1999, Jakarta.
- Nursyamsi, D., dkk. 2001. "Kandungan Beberapa Ion di dalam Sumber Air di Sub DAS Citarik dan DAS Kaligarang". Dalam *Prosiding Seminar Nasional Multifungsi Lahan Sawah*, hlm. 103–109. Bogor, 1 Mei 2001. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Rogers J.E. dan W.B. Whitman (Ed.), *Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Methane, Nitrogen Oxides and Halomethanes*. Washington D.C: American Society for Microbiology. Hal. 201–217.
- Saeni, M.S. 1989. "Kimia Lingkungan". Pusat Antar Universitas (PAU) Ilmu Hayat. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Sass, R.L. and F.M. Fisher. 1997. "Methane Emission from Rice Paddies: a Process Study". *Nutr. Cycl. in Agroecosyst*, 49: 119–127.
- Segers, R. and S.W.M. Kenger. 1997. "Methane Production as a Function of Anaerobic Carbon Mineralization: A Process Model". *Soil Biology and Biochemistry* 30: 1.107–1.117.
- Setyanto, P. 2004. "Methane Emission and Its Mitigation in Ricefields Under Different Management Practices in Central Java". Disertasi Program Doktorat, Malaysia: Universiti Putra.
- Setyanto, dkk. 2007. "Emisi Gas Rumah Kaca pada Berbagai Sistem Pengelolaan". Laporan Hasil Penelitian. Balai Penelitian Lingkungan Pertanian.
- Stauffer, B.R. and Neftel. 1988. "What have We Learned from Ice Cores About the Atmospheric Changes in the Concentrations of Nitrous Oxide, Hydrogen Peroxide and Other Trace Species". Dalam F.S. Rowland

- and I.S.A. Isaksen (Ed.), *The changing atmosphere*. Hal 63–77. John Wiley and Sons Ltd. Chichester.
- Suganda, H., dkk. 2003. “Evaluasi Pencemaran Limbah Industri Tekstil untuk Kelestarian Lahan Sawah”. *Prosiding Seminar Nasional Multifungsi dan Konversi Lahan Pertanian*. Bogor, 2 Oktober dan Jakarta, 25 Oktober 2002. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Sutono, S., dkk. 2003. “Erosi pada Berbagai Penggunaan Lahan di DAS Citarum”. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Multifungsi dan Konversi Lahan Pertanian*, hlm. 113–133. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Tala’ohu, S.H., dkk. 2001. “Hubungan Perubahan Penggunaan Lahan dengan Daya Sangga Air Sub DAS Citarik dan DAS Kaligarang”. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Multifungsi Lahan Sawah*. Hlm. 93–102. Bogor, 1 Mei 2001. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Taylor, *et al.* 1991. “A Study of the Sources and Sinks of Methane and Methyl Chloroform Using a Global Three-Dimensional Lagrangian Tropospheric Tracer Transport Model”. *J. Geophys Chem* 96: 3013–3044.
- Taylor, K.E. and M.C. MacCracken. 1990. Projected Effect of Increasing Concentrations of Carbon Dioxide and Trace Gases on Climate. p. 1–17. In B.A. Kimball, *et al.* (Ed.), *Impact of Carbon Dioxide, Trace Gases, and Climate Change on Global Agriculture*. American Society of Agronomy, Inc. Madison, USA. 133 p.
- United Nations Development Programme. 2007. Human Development Index 2007/2008. UNDP, New York.
- Watung, R.L., dkk. 2003. “Fungsi Lahan Sawah dalam Preservasi Air”. *Prosiding Seminar Nasional Multifungsi dan Konversi Lahan Pertanian*. Hal. 149–157. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.