

Mobilitas Sedimen dan Hara pada Sistem Sawah Berteras Dengan Irigasi Tradisional

Sediment and Nutrient Mobility in Terraced Paddy Fields under Traditional Irrigation System

SUKRISTIYONUBOWO¹

ABSTRAK

Mobilitas sedimen dan hara pada sistem sawah berteras dengan irigasi tradisional telah diteliti di Desa Keji, Kabupaten Semarang pada Musim Hujan 2003-2004. Tujuan penelitian adalah mengevaluasi sedimen dan hara tanaman yang terbawa masuk melalui air irigasi dan yang terangkut keluar oleh larutan sedimen selama pertumbuhan tanaman padi dan mempelajari mobilitas sedimen dan hara tanaman pada musim hujan. Perlakuan yang diuji, meliputi Praktek Petani, Praktek Petani + Jerami, Perbaikan Teknologi, dan Perbaikan Teknologi + Jerami. Debit air irigasi saat pelumpuran adalah yang tertinggi, dan bervariasi mulai $2,55 \pm 1,23$ sampai $3,10 \pm 0,55$ l detik⁻¹. Sebaliknya, pada stadia vegetatif debit air irigasi adalah yang terkecil, yaitu antara $0,33 \pm 0,15$ dan $0,54 \pm 0,15$ l detik⁻¹, dan pada stadia generatif antara $1,38 \pm 0,28$ dan $1,60 \pm 0,06$ l detik⁻¹. Selanjutnya, debit larutan sedimen saat pelumpuran berkisar mulai $0,89 \pm 0,20$ sampai $1,31 \pm 0,34$ l detik⁻¹. Pada stadia vegetatif debit larutan sedimen adalah yang terkecil, yaitu antara $0,21 \pm 0,07$ dan $0,78 \pm 0,52$ l detik⁻¹, sedangkan pada stadia generatif antara $1,13 \pm 0,06$ dan $1,32 \pm 0,09$ l detik⁻¹. Hanya pada saat pelumpuran sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi lebih kecil dari pada sedimen yang terangkut keluar oleh larutan sedimen. Banyaknya sedimen yang tersimpan adalah antara 647 sampai 1.589 kg ha⁻¹ musim⁻¹ dari total sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi antara 2.715 sampai 5.521 kg ha⁻¹ musim⁻¹. Sebaliknya, hara terlarut (nitrogen, fosfor dan kalium) yang terbawa masuk oleh air irigasi tersimpan di persawahan, yang bervariasi antara 7,20 - 13,62 kg N; 0,13 - 0,20 kg P; dan 7,25 - 13,42 kg K ha⁻¹ musim⁻¹. Secara statistik, antar perlakuan tidak menunjukkan perbedaan yang nyata, baik untuk jumlah sedimen maupun hara yang tersimpan. Hasil penelitian ini mendemonstrasikan adanya fungsi lain (*external services*) yang diberikan oleh sistem sawah berteras, selain sebagai tempat memproduksi beras

Kata kunci : Debit, Sedimen, Nitrogen, Fosfor, Kalium, Sawah berteras

ABSTRACT

Sediment and nutrient mobility in terraced paddy fields under traditional irrigation system have been investigated in Keji Village, the Semarang District during the Wet Season 2003-2004. The aims were to evaluate the incoming and outgoing sediment and nutrient during rice growth cycle and to study the mobility of sediment and nutrient in the wet season. The treatments included Farmer Practices, Farmer Practices + Rice Straw, Improved Technology, and Improved Technology + Rice Straw. The discharge of irrigation water during puddling was the greatest varying between 2.55 ± 1.23 and 3.10 ± 0.55 l second⁻¹, while during the vegetative phase was the lowest ranging from 0.33 ± 0.15 to 0.54 ± 0.15 l second⁻¹. At the generative stage

was about 1.38 ± 0.28 to 1.60 ± 0.06 l second⁻¹. Furthermore, the discharge of suspended sediment during puddling varied between 0.89 ± 0.20 and 1.31 ± 0.34 l second⁻¹, while at vegetative phase was the lowest ranging from 0.21 ± 0.07 to 0.78 ± 0.52 l second⁻¹. At generative stage was about 1.13 ± 0.06 to 1.32 ± 0.09 l second⁻¹. Only during the puddling that the incoming sediment was lower than outgoing sediment. The total amount of deposited sediment varied between 647 and 1,589 kg ha⁻¹ season⁻¹ from the total incoming sediment of 2,715 to 5,521 kg ha⁻¹ season⁻¹. In contrast, the incoming dissolved nutrient (nitrogen, phosphorus and potassium) was trapped in the paddy field areas, varying between 7.20 and 13.62 kg N; 0.13 and 0.20 kg P; and from 7.25 to 13.42 kg K ha⁻¹ season⁻¹. There were no significantly different among treatments, both for sediment and nutrient deposited. These results demonstrate that terraced paddy field system is not only place for producing rice, but also providing an environmental services, like nutrient and sediment conserving.

Keywords : Discharge, Sediment, Nitrogen, Phosphorus, Potassium, Terraced paddy field

PENDAHULUAN

Di Indonesia, beras tidak hanya merupakan bahan makanan utama, namun juga sebagai sumber pendapatan dan penyedia lapangan pekerjaan. Seiring dengan meningkatnya (1) permintaan akan beras akibat bertambahnya jumlah penduduk, (2) kebutuhan lahan untuk perumahan, kawasan industri dan fasilitas jalan, (3) kompetisi kebutuhan air antara sektor pertanian, industri dan rumah tangga, dan (4) pencemaran air, menyebabkan luas lahan sawah beririgasi yang tersedia untuk penanaman padi menjadi semakin menciut dan keberadaan air untuk kepentingan irigasi menjadi semakin langka yang pada akhirnya menurunkan produksi padi (Baghat *et al.*, 1996; Bouman and Tuong, 2001; BPS, 2002). Oleh sebab itu, sistem sawah berteras perlu mendapatkan perhatian yang lebih baik guna membantu pemenuhan target tambahan produksi dua juta ton per tahun dan menjamin ketahanan beras nasional (Anonim, 2007).

1. Peneliti pada Balai Penelitian Tanah, Bogor

Sedimen dan unsur hara yang diperlukan tanaman dapat terangkut melalui angin (*wind erosion*), air (*water erosion*), pengolahan tanah (*tillage erosion*), dan perpindahan masa tanah (*mass movement*) yang dapat menimbulkan masalah lingkungan dan pertanian, sehingga memerlukan penelitian lebih lanjut (Uexkull, 1970; Lal, 1998; Lal *et al.*, 1998; Agus dan Sukristiyonubowo, 2003; Duque *et al.*, 2003; Phomassack *et al.*, 2003; Sukristiyonubowo *et al.*, 2003 dan 2004; Toan *et al.*, 2003; Visser *et al.*, 2005; Aksoy and Kavvas, 2005; Sukristiyonubowo, 2007 dan 2008).

Beberapa hasil penelitian terdahulu melaporkan bahwa banyaknya unsur hara yang terangkut dari lahan pertanian dipengaruhi oleh iklim, tanah, topografi lahan, tipe penggunaan lahan, dan cara pengelolaan lahan dan tanaman (Lal, 1998; Lal *et al.*, 1998; Agus *et al.*, 2003; Sukristiyonubowo *et al.*, 2003; Robichaud *et al.*, 2006; Udawatta *et al.*, 2006; Sukristiyonubowo, 2007). Berkaitan dengan iklim, Daniel *et al.* (1998) melaporkan bahwa jumlah, intensitas, dan waktu terjadinya hujan adalah yang paling dominan mempengaruhi jumlah kandungan dan jenis bahan-bahan kimia termasuk pupuk yang terkandung dalam aliran permukaan (*surface run-off*). Secara spesifik, Schuman dan Burwell (1974) mencatat bahwa intensitas dan lamanya peristiwa hujan, kecepatan infiltrasi, kondisi kelembaban awal tanah, dan kondisi kesuburan tanah berpengaruh nyata terhadap konsentrasi $\text{NH}_4\text{-N}$ dan $\text{NO}_3\text{-N}$ pada *runoff*. Selanjutnya, Kissel *et al.* (1976), dan Douglas *et al.* (1998) menyimpulkan bahwa N dan P yang hilang melalui *runoff* tergolong kecil, walaupun pemupukan diberikan secara sebar dan pengolahan tanah dilakukan secara atas bawah (*uphill and downhill*). Kesimpulan yang sama dikemukakan Alberts *et al.* (1978) bahwa N dan P terlarut yang hilang dari lahan pertanian berkisar 2% dari jumlah pupuk yang diberikan dalam setahun dan sistem teras sangat nyata melindungi keberadaan hara tanaman.

Telah banyak diteliti dan dipublikasikan bahwa penanaman padi di lahan basah banyak memerlukan air dan paling tidak efisien dalam menggunakan air

dibandingkan dengan tanaman biji-bijian lainnya. Pada penanaman padi sawah (*wetland rice cultivation*), air diberikan mulai dari fase penjemuran tanah (*land soaking*) sampai dengan akhir fase pertumbuhan generatif (Anonim, 1977; Sukristiyonubowo, 2007). Dari beberapa hasil penelitian yang dilakukan di India, Filipina, dan Jepang dikemukakan bahwa produktivitas air (*water productivity*) pada penanaman padi sawah berkisar antara 0,14-1,10 g kg⁻¹ air (Bhuiyan, 1992; Bhuiyan *et al.*, 1994; Bouman and Tuong, 2001; Cabangon *et al.*, 2002; Tabal *et al.*, 2002; IWMI, 2004). Produktivitas air yang lebih baik dilaporkan pada sawah Vitric Andosol di Jepang yaitu sekitar 1,52 g gabah kg⁻¹ air (Anbumozhi *et al.*, 1998).

Irigasi tradisional pada sawah berteras umumnya dilakukan dengan membuka dan menutup saluran air masuk dan saluran air keluar yang dibangun secara sederhana oleh petani. Sumber air irigasi berasal dari mata air yang ada di kawasan atas atau air hujan yang mengalir melalui kanal-kanal alami. Cara ini memungkinkan sedimen dan unsur hara terbawa masuk dan terangkut keluar lahan sawah melalui pergerakan air tersebut. Fenomena ini sangat menarik dan perlu dipelajari lebih lanjut dalam hubungannya dengan kondisi di lahan (*on-site impacts*) dan di luar lahan (*off-site impacts*). Penelitian mengenai hubungan antara pelumpuran dengan sifat fisik tanah, sifat kimia tanah, pertumbuhan dan hasil padi telah banyak dibahas dan dipublikasikan (Ghildyal, 1971; Naphade and Ghildyal, 1971; Sanchez, 1973; Sharma and De Datta, 1986; Adachi, 1990; Cabangon and Tuong, 2000; Kirchhof *et al.*, 2000; Kukal and Sidhu, 2004). Namun demikian, penelitian mengenai mobilitas sedimen dan hara tanaman pada sawah termasuk sistem sawah berteras masih jarang dilakukan. Hasil penelitian saat pelumpuran pada sistem sawah berteras menunjukkan bahwa sejumlah tanah dan unsur hara N dan P terangkut keluar, sebaliknya sejumlah kalium dideposit pada lahan sawah. Besarnya tanah yang hilang (*soil loss*) bervariasi antara 239-530 kg ha⁻¹ pada musim hujan dan antara 154-270 kg ha⁻¹ pada musim kemarau,

sedangkan kalium yang tersimpan berkisar 0,58 kg K ha⁻¹ pada musim hujan dan 0,44 kg K ha⁻¹ pada musim kemarau (Sukristiyonubowo, 2007; 2008). Tulisan ini membahas mobilitas sedimen dan hara selama pertumbuhan tanaman padi pada musim hujan 2003-2004 (MH 2003-2004). Tujuannya adalah untuk mengevaluasi sedimen dan hara yang masuk dan keluar selama siklus pertumbuhan padi dan mempelajari pergerakan sedimen dan hara tanaman selama siklus pertumbuhan padi pada MH 2003-2004.

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilaksanakan pada MH 2003-2004 di Desa Keji, Kabupaten Semarang. Desa Keji terletak pada ketinggian antara 390-510 m dpl dengan rata-rata curah hujan tahunan 3.140 mm (Sukristiyonubowo, 2007). Dua belas sawah berteras, menggambarkan empat perlakuan dan tiga ulangan, dengan jumlah teras dan luasan yang berbeda digunakan dalam penelitian ini. Teras bersifat datar, berlainan ukuran, tersusun dari atas ke bawah menuju sungai. Masing-masing teras mempunyai satu saluran air masuk dan satu saluran air keluar. Saluran air masuk pada teras paling atas, dimana air irigasi masuk ke lahan sawah disebut saluran air masuk utama (*main inlet*) dan saluran air keluar pada teras paling bawah, dimana larutan sedimen mengalir menuju ke sungai disebut saluran air keluar utama (*main outlet*). Karakteristik selengkapnya dari masing-masing lahan sawah disajikan pada Tabel 1.

Pengamatan dilakukan pada perlakuan Praktek Petani (FP), Praktek Petani + Pengembalian Jerami (FP+RS), Perbaikan Teknologi (IT) dan Perbaikan Teknologi + Pengembalian Jerami (IT+RS). Perlakuan diatur mengikuti pola Rancangan Acak Kelompok, dimana masing-masing perlakuan diulang tiga kali. Banyaknya jerami yang dikembalikan ke sawah adalah 33% ha⁻¹ musim⁻¹ dari total produksi jerami musim sebelumnya. Takaran tersebut sebagai kesepakatan bersama dengan petani, mengingat di desa ini jerami merupakan sumber pakan utama untuk ternak sapi. Pada perlakuan FP, petani hanya memberi urea sebanyak 50 kg ha⁻¹ musim⁻¹,

sedangkan takaran pemupukan pada perlakuan IT dan IT+RS adalah 100 kg urea, 100 kg TSP, dan 100 kg KCl ha⁻¹ musim⁻¹.

Pelumpuran dilakukan antara Desember 2003 dan Januari 2004. Penanaman dilakukan dengan cara pindahan (*transplanting*) yang dilakukan pada bulan Januari 2004. Tindak agronomis selengkapnya disajikan pada Tabel 2.

Mobilitas sedimen dan hara didefinisikan sebagai pergerakan sedimen dan hara yang terbawa masuk oleh air irigasi ke areal persawahan dan yang terangkut keluar oleh larutan sedimen menuju sungai. Analisis statistik hanya ditekankan pada penghitungan nilai rerata (*mean*) dan standar deviasi (*standard deviation*). Untuk mengetahui pengaruh perlakuan dilakukan analisis sidik ragam (Anova), dilanjutkan dengan uji *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) dengan selang kepercayaan 5% yang dihitung dengan menggunakan program SPSS versi 11.5 for Windows.

Urea diberikan dua kali, yaitu pada umur 21 and 35 hari setelah tanam (HST) masing-masing setengah takaran, sedangkan TSP dan KCl diberikan semua pada umur 21 HST. Banyaknya pupuk yang diberikan setiap teras dihitung berdasarkan takaran pupuk per hektar dikalikan dengan ratio antara jumlah tanaman per teras dengan jumlah tanaman per hektar. Penanaman dilakukan pada saat bibit berumur 21 hari dengan jarak tanam 25 cm x 25 cm.

Pengamatan meliputi pengambilan contoh dan pengukuran debit air irigasi dan larutan sedimen pada saluran air masuk utama (*main inlet*) dan saluran air keluar utama (*main outlet*), seta kadar lumpur dan konsentrasi hara terlarut. Pengamatan dilakukan selama pertumbuhan dan perkembangan tanaman padi, yaitu mulai dari pelumpuran sampai dengan akhir stadia generatif. Lamanya waktu buka-tutup saluran air masuk utama dan air keluar utama selama pengairan berlangsung juga dicatat, untuk menghitung total volume air irigasi dan larutan sedimen. Data ini diperlukan untuk menduga sedimen dan hara terlarut yang terbawa masuk dan yang terangkut keluar, dengan cara mengalikannya dengan kadar lumpur atau konsentrasi hara.

Tabel 1. Karakteristik lahan sawah yang digunakan untuk penelitian*Table 1. Some characteristics of terraced paddy fields used for the research*

Perlakuan	Petani	Ulangan	Jumlah teras	Luas m ²	Keterangan lain
FP	P-1	I	9	5.040	2-3 kali tanam per tahun
	P-2	II	8	4.780	2-3 kali tanam per tahun
	P-3	III	6	1.680	2-3 kali tanam per tahun
FP + RS	P-4	I	8	904	2-3 kali tanam per tahun
	P-5	II	5	2.500	2-3 kali tanam per tahun
	P-6	III	7	5.300	2-3 kali tanam per tahun
IT	P-7	I	7	5.000	2-3 kali tanam per tahun
	P-8	II	7	4.500	2-3 kali tanam per tahun
	P-9	III	8	3.070	2-3 kali tanam per tahun
IT + RS	P-10	I	9	2.240	2-3 kali tanam per tahun
	P-11	II	8	1.530	2-3 kali tanam per tahun
	P-12	III	4	3.400	2-3 kali tanam per tahun

Sumber data : Kantor Kelurahan, komunikasi pribadi, dan kunjungan lapangan

Tabel 2. Tanggal tanam, pengembalian jerami, dan takaran pemupukan untuk masing-masing perlakuan pada MH 2003-2004*Table 2. Date of planting, the total amount of returned rice straw, and rate of fertilizers for each treatment in the WS 2003-2004*

Perlakuan	Ulangan	Tanggal tanam	Jerami yang dikembalikan t ha ⁻¹	Takaran kg ha ⁻¹ musim ⁻¹		
				Urea	TSP	KCl
FP	I	11-01-2004	-	50	-	-
	II	13-01-2004	-	50	-	-
	III	10-01-2004	-	50	-	-
FP + RS	I	01-01-2004	2,15	50	-	-
	II	31-12-2003	2,97	50	-	-
	III	03-01-2004	3,26	50	-	-
IT	I	04-01-2004	-	100	100	100
	II	05-01-2004	-	100	100	100
	III	06-01-2004	-	100	100	100
IT + RS	I	27-01-2004	2,48	100	100	100
	II	28-01-2004	2,64	100	100	100
	III	29-01-2004	2,15	100	100	100

Dua buah botol plastik digunakan untuk setiap pengambilan contoh air irigasi dan larutan sedimen. Satu contoh untuk keperluan pengukuran kadar lumpur dan satu botol contoh lainnya untuk penetapan N (NO_3^- dan NH_4^+), P (PO_4^-), dan K (K^+) terlarut.

Pada saat pelumpuran, pengambilan contoh dan pengukuran debit air irigasi dilakukan mulai jam

07:00, ketika petani mulai membuka saluran air masuk utama dan berakhir pada jam 17:30. Untuk larutan sedimen dimulai ketika larutan sedimen yang berwarna coklat mengalir melalui saluran air keluar utama dan berakhir ketika warna larutan sedimen sama dengan warna air irigasi yang masuk ke areal sawah. Namun karena alasan keamanan dan hari sudah senja, pengamatan diakhiri pada jam 17:30.

Interval pengambilan contoh dan pengukuran debit air irigasi dan larutan sedimen dilakukan setiap 30 menit. Prosedur lebih rinci dapat dilihat pada Sukristiyonubowo (2007 dan 2008).

Pengamatan setelah pelumpuran sampai sebelum tanam dilakukan setiap hari. Pengambilan contoh dan pengukuran debit air irigasi dan larutan sedimen dilakukan tiga kali per hari, yaitu jam 08:00, 12:00, dan 16:00, yang mengacu pada pengamatan kanal-kanal untuk kepentingan analisis hidrologis.

Pada stadia vegetatif, pengambilan contoh dan pengukuran debit air irigasi dan larutan sedimen dilakukan selama seminggu sebelum dan setelah pemupukan pertama diberikan. Seperti pada pengamatan setelah pelumpuran sampai sebelum tanam, pengambilan contoh dan pengukuran debit air irigasi dan larutan sedimen dilakukan tiga kali per hari, yaitu pada jam 08:00, 12:00, dan 16:00.

Pada stadia generatif, pengambilan contoh air irigasi, larutan sedimen dan pengukuran debitnya dikerjakan ketika petani membuka dan menutup saluran air masuk utama dan saluran air keluar untuk mengairi sawah (untuk mengganti air yang telah ada di sawah dan mempertahankan ketinggian air pada petakan sawah). Pengamatan juga dilakukan tiga kali sehari seperti halnya pada stadia vegetatif.

Data yang dikumpulkan meliputi debit, kadar lumpur, dan konsentrasi N, P dan K terlarut pada air irigasi dan larutan sedimen. Penetapan unsur hara yang terlarut (*dissolved nutrient*) dilakukan untuk nitrogen (NO_3^- dan NH_4^+), fosfat (PO_4^-), dan kalium (K^+) menurut prosedur yang berlaku di Laboratorium Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian, Bogor. Ammonium (N-NH_4^+), nitrat (N-NO_3^-) dan fosfat (PO_4^-) ditetapkan dengan prosedur *colorimeter*, sedangkan kalium dengan *flame photometer*. Nitrogen terlarut merupakan penjumlahan dari N-NH_4^+ dan N-NO_3^- . Unsur N, P, dan K yang terkandung dalam sedimen diduga melalui kandungan N, P, dan K pada lapisan tanah atas (*top soil*) dengan total sedimen yang terbawa masuk dan terangkut keluar. Cara ini dilakukan karena sedimen

yang terkumpul dari contoh larutan sedimen maupun dari air irigasi tidak mencukupi untuk keperluan analisis di laboratorium. El-Swaify (1989) dan Hashyim *et al.* (1998) menyatakan jumlah unsur hara yang terangkut oleh erosi adalah hasil perkalian antara tanah yang hilang dengan konsentrasi hara pada tanah tersebut, namun demikian dapat juga diduga melalui tanah yang hilang dengan kandungan hara pada lapisan *top soil*. Dalam makalah ini, hara yang terkandung dalam sedimen tidak dibahas.

Debit air irigasi pada saluran masuk utama diukur dengan menggunakan *Floating Method with stopwatch* dan untuk debit larutan sedimen pada saluran keluar utama menggunakan metode buket (*Bucket Method*). Ember bervolume 11 liter digunakan untuk penetapan debit larutan sedimen dengan *Bucket Method*.

Debit air irigasi dengan menggunakan *Floating Method with stopwatch* dihitung berdasarkan formula sebagai berikut :

$$Q = (L \times W \times H) \times 1.000/t$$

dimana,

Q = Debit (l detik^{-1})

L = Panjang atau jarak (m)

W = Lebar (m)

H = Tinggi air (m)

t = Waktu (detik)

1.000 adalah konversi dari m^3 ke l

Debit larutan sedimen (*bucket method*) dihitung dengan formula sebagai berikut :

$$Q = 11/t$$

dimana,

Q = Debit (l detik^{-1})

t = Waktu untuk mencapai 11 liter (detik)

Sedimen yang masuk atau keluar dihitung berdasar rumus :

$$(E) = (A \times S)/1.000$$

dimana :

- E = Sedimen yang terbawa masuk atau keluar (kg)
 A = Total air irigasi yang masuk atau larutan yang keluar (*volume of runoff*) (l)
 S = Konsentrasi sedimen atau kadar lumpur (g l^{-1})
 1.000 adalah konversi dari g ke kg

Rumus-rumus tersebut juga berlaku untuk menghitung hara yang masuk dan yang keluar, dengan cara memasukkan konsentrasi N, P dan K sebagai ganti kadar lumpur. Alasan penggunaan metode pengukuran, cara pengukuran dan penghitungan debit dengan *bucket method* dan *floating method with stopwatch* dapat dilihat dalam Yuqian (1989), WMO (1994), dan Sukristiyonubowo (2007 dan 2008).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Mobilitas Sedimen selama Pertumbuhan dan Perkembangan Padi

Debit dan kadar lumpur air irigasi dan larutan sedimen

Hasil pengukuran debit dan konsentrasi sedimen air irigasi pada saluran air masuk utama (*main inlet*) dan larutan sedimen pada saluran air keluar utama (*main outlet*) selama pertumbuhan tanaman padi disajikan pada Tabel 3. Secara umum, debit air irigasi pada saat pelumpuran yang diukur pada saluran air masuk utama adalah yang paling besar jika dibandingkan dengan pada stadia pertumbuhan padi yang lain. Hal ini dikarenakan pada saat pelumpuran debit kanal ditingkatkan dan petani membuka lebih lebar saluran air masuk utama dengan maksud untuk menjenuhkan lahan dengan air, mempermudah proses pelumpuran, dan untuk meratakan permukaan lapisan olah yang telah selesai dibajak. Proses ini berlangsung sampai menjelang tanam, sehingga diperoleh permukaan area tanam yang rata agar pemindahan bibit (tanam) lebih mudah. Ini juga yang menjadi alasan bahwa debit air irigasi setelah pelumpuran sampai sebelum

penanaman lebih besar dibandingkan pada saat stadia vegetatif dan sebanding dengan stadia generatif. Besarnya debit air irigasi saat pelumpuran berkisar antara $2,55 \pm 1,23$ sampai $3,10 \pm 0,55$ l detik⁻¹. Kecenderungan hasil yang sama disimpulkan oleh para peneliti terdahulu. Mereka menyatakan bahwa pada saat pengolahan tanah, sawah memerlukan air yang paling banyak. Hampir separuh air yang dibutuhkan untuk menghasilkan padi dialokasikan untuk pengolahan tanah. Hal ini menyiratkan bahwa debit air pada saat pengolahan tanah adalah yang terbesar. De Datta (1981) dan Bhuiyan *et al.* (1994) melaporkan bahwa air yang diperlukan untuk pengolahan tanah berkisar antara 150-200 mm, namun dapat meningkat hingga 650-900 mm. Selanjutnya, Bouman *et al.* (2005) melaporkan bahwa jumlah air yang digunakan untuk pengolahan sawah (mulai dari penjenuhan sampai pelumpuran) bervariasi antara 360-434 mm.

Pada stadia vegetatif, pengairan terutama ditujukan untuk menjaga ketinggian air (*ponding water layer*) antara 3 dan 5 cm sesuai dengan ketinggian tanaman padi, kebutuhan tanaman padi akan air, dan untuk menekan laju pertumbuhan gulma. Oleh karena itu, air irigasi yang masuk melalui saluran air masuk utama (*main inlet*) diatur sekecil mungkin agar tidak merusak tanaman padi yang masih muda.

Akibatnya, pada stadia vegetatif debit air irigasi adalah yang terkecil, yaitu berkisar antara $0,33 \pm 0,15$ sampai $0,54 \pm 0,15$ l detik⁻¹.

Meningkatnya debit air irigasi pada saat stadia generatif diduga kuat karena kebutuhan padi akan air meningkat dan untuk meningkatkan tinggi genangan air (*ponding water layer*) sekitar 7 cm (Sukristiyonubowo *et al.*, 2004). Debit air irigasi pada stadia generatif berkisar antara $1,38 \pm 0,28$ sampai $1,60 \pm 0,06$ liter detik⁻¹.

Kecenderungan yang sama terjadi pula pada pengukuran debit larutan sedimen, dimana debit larutan sedimen saat pelumpuran dan sebelum tanam menunjukkan nilai yang tertinggi. Penyebabnya berkaitan dengan debit air irigasi pada saat pelumpuran yang tertinggi. Besarnya debit

Tabel 3. Rata-rata debit, konsentrasi sedimen, dan sedimen yang terbawa air irigasi dan larutan sedimen selama pertumbuhan padi, MH 2003-2004

Table 3. Average discharge, sediment concentration, and transported sediment by irrigation water measured at main inlet and suspended sediment measured at main outlet during rice growth in the WS 2003-2004

Perlakuan/ pengamatan	Air irigasi			Larutan sedimen		
	Debit	Kadar lumpur	Sedimen	Debit	Konsentrasi sedimen	Sedimen
	l detik ⁻¹	g l ⁻¹	kg ha ⁻¹	l detik ⁻¹	g l ⁻¹	kg ha ⁻¹
Pelumpuran						
FP	3,10 ± 0,55 a*	0,330 ± 0,05 a	+ 204 a	1,14 ± 0,14 a	3,550 ± 0,46 a	- 684 a
FP + RS	2,55 ± 1,23 a	0,310 ± 0,19 a	+ 280 a	1,31 ± 0,34 a	2,880 ± 1,42 a	- 546 a
IT	2,72 ± 1,27 a	0,490 ± 0,09 c	+ 235 a	1,20 ± 0,46 a	3,580 ± 1,13 a	- 491 a
IT + RS	2,84 ± 0,53 a	0,420 ± 0,05 b	+ 361 a	0,89 ± 0,20 a	3,090 ± 1,81 a	- 599 a
Sebelum tanam						
FP	1,45 ± 0,20 a	0,287 ± 0,021 a	+ 686 a	1,17 ± 0,19 a	0,273 ± 0,015 a	- 527 a
FP + RS	1,39 ± 0,39 a	0,313 ± 0,025 a	+ 1.150 a	1,17 ± 0,30 a	0,280 ± 0,010 a	- 888 a
IT	1,46 ± 0,23 a	0,307 ± 0,025 a	+ 565 a	1,06 ± 0,12 a	0,283 ± 0,025 a	- 381 a
IT + RS	1,54 ± 0,21 a	0,303 ± 0,047 a	+ 1.088 a	1,28 ± 0,10 a	0,270 ± 0,026 a	- 814 a
Stadia vegetatif						
FP			+ 2.093 a			- 1.284 a
FP + RS			+ 2.783 a			- 1.870 a
IT			+ 1.260 a			- 774 a
IT + RS			+ 2.835 a			- 1.608 a
• Sebelum pemupukan						
FP	0,79 ± 0,51 a	0,267 ± 0,021 a		0,78 ± 0,52 a	0,237 ± 0,015 a	
FP + RS	0,37 ± 0,21 a	0,267 ± 0,021 a		0,25 ± 0,19 a	0,243 ± 0,021 a	
IT	0,54 ± 0,15 a	0,280 ± 0,306 a		0,36 ± 0,11 a	0,237 ± 0,015 a	
IT + RS	0,35 ± 0,16 a	0,283 ± 0,045 a		0,21 ± 0,07 a	0,267 ± 0,051 a	
• Setelah pemupukan						
FP	0,57 ± 0,37 a	0,247 ± 0,015 a		0,51 ± 0,35 a	0,223 ± 0,015 a	
FP + RS	0,36 ± 0,28 a	0,237 ± 0,021 a		0,27 ± 0,20 a	0,220 ± 0,030 a	
IT	0,50 ± 0,13 a	0,250 ± 0,010 a		0,38 ± 0,11 a	0,223 ± 0,015 a	
IT + RS	0,33 ± 0,15 a	0,243 ± 0,015 a		0,21 ± 0,17 a	0,220 ± 0,020 a	
Stadia generatif						
FP	1,60 ± 0,06 a	0,207 ± 0,012 a	+ 963 a	1,32 ± 0,09 a	0,170 ± 0,017 a	- 655 a
FP + RS	1,38 ± 0,28 a	0,203 ± 0,021 a	+ 1.237 a	1,15 ± 0,22 a	0,177 ± 0,031 a	- 925 a
IT	1,50 ± 0,12 a	0,243 ± 0,015 a	+ 655 a	1,13 ± 0,06 a	0,173 ± 0,012 a	- 422 a
IT + RS	1,51 ± 0,07 a	0,207 ± 0,015 a	+ 1.237 a	1,24 ± 0,11 a	0,180 ± 0,010 a	- 911 a
Jumlah sedimen						
FP			+ 3.946 a			- 3.150 a
FP + RS			+ 5.450 a			- 4.229 a
IT			+ 2.715 a			- 2.068 a
IT + RS			+ 5.521 a			- 3.932 a

*) Angka pada kolom yang sama untuk pengamatan yang sama yang diikuti huruf yang sama tidak berbeda nyata pada *Duncan Multiple Range Test* dengan selang kepercayaan 5%

(+) = sedimen yang terbawa masuk, (-) = sedimen yang terangkut keluar

larutan sedimen saat pelumpuran dan sebelum tanam adalah $1,31 \pm 0,34$ dan $1,28 \pm 0,10$ liter detik⁻¹.

Jika dibandingkan dengan debit air irigasi, debit larutan sedimen adalah lebih rendah. Selain karena larutan sedimen mengandung kadar lumpur yang lebih tinggi, penurunan ini mungkin juga

berkaitan dengan jumlah teras, ukuran teras dan luas lahannya. Penurunan debit ini mendemonstrasikan bahwa ada penghambatan laju air yang dilakukan oleh sistem sawah berteras, yang memungkinkan terjadinya pengendapan material yang dibawanya (yaitu sedimen dan hara tanaman).

Fenomena yang sama diamati pada kadar lumpur air irigasi, walaupun besarnya kadar lumpur lebih tergantung pada aktivitas yang terjadi di kawasan atas (*upstream*). Selama periode pengukuran, persawahan kawasan atas juga sedang berlangsung kegiatan pengolahan tanah. Larutan sedimen yang terbuang keluar dari sawah-sawah kawasan atas berperan dalam meningkatkan kadar lumpur air irigasi yang masuk ke lahan sawah. Adanya erosi tebing (*stream bank erosion*) diduga juga menambah besarnya kadar lumpur air irigasi. Akibatnya, kadar lumpur air irigasi pada saat pelumpuran adalah yang paling tinggi dibandingkan dengan pada stadia pertumbuhan padi lainnya. Besar kadar lumpur air irigasi saat pelumpuran adalah berkisar antara $0,31 \pm 0,19$ sampai $0,49 \pm 0,09 \text{ g l}^{-1}$.

Pola yang sama juga didapat pada pengukuran kadar lumpur larutan sedimen. Kadar lumpur larutan sedimen, yang diukur pada saluran air keluar utama, saat pelumpuran adalah yang paling tinggi, hampir mencapai 10 sampai 20 kali lebih besar dibandingkan dengan saat stadia pertumbuhan padi lainnya (Tabel 3). Hal ini disebabkan pada saat pelumpuran terjadi perubahan struktur tanah yang drastis dan signifikan, yaitu dari bongkahan tanah menjadi struktur lumpur (*puddled structure*) akibat benturan langsung saat pencangkulan dan pelumpuran. Struktur lumpur dengan tekstur halus (*clay*) yang terdispersi ini lebih mudah terbawa aliran air dari pada dalam bentuk agregat tanah. Sebaliknya, pada pengukuran stadia lainnya tidak terjadi gangguan sama sekali pada struktur tanahnya. Selain itu, tanaman padi sudah mulai tumbuh dan berkembang sehingga dapat menahan benturan langsung air hujan ke permukaan tanah (*splash erosion*) dan ada kemungkinan pengaruh dari tinggi genangan air (sekitar 7 cm) dalam menahan *splash erosion* (Sukristiyonubowo *et al.*, 2004). Besarnya kadar lumpur larutan sedimen saat pelumpuran berkisar antara $2,88 \pm 1,42$ sampai $3,58 \pm 1,13 \text{ g l}^{-1}$, lebih tinggi 2,70 - 3,41 g l^{-1} jika dibandingkan dengan stadia lainnya.

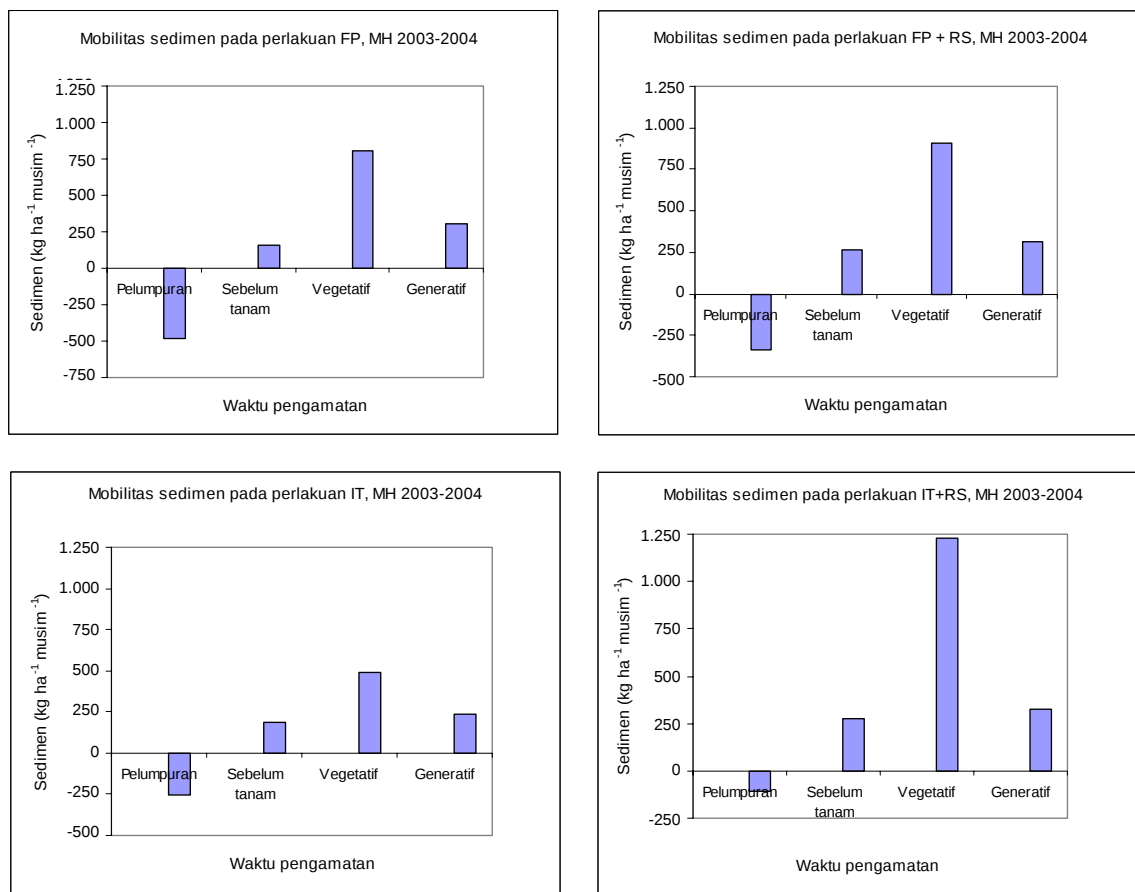
Berhubung pengukuran dilakukan pada musim hujan, tentunya faktor luar yang dominan

berpengaruh terhadap besar kecilnya debit dan kadar lumpur air irigasi berikut larutan sedimen adalah curah hujan, selain adanya kontribusi dari erosi tebing kanal (*stream bank erosion*). Data ini menjadi sangat penting untuk mengevaluasi variasi musiman (*seasonal variation*) agar diperoleh gambaran yang utuh tentang fungsi lain dari sistem sawah berteras terhadap lingkungan (*Environmental services of terraced paddy field system*).

Sedimen yang terbawa masuk dan yang terangkut keluar

Sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi melalui saluran air masuk utama dan yang terangkut keluar oleh larutan sedimen lewat saluran air keluar utama selama pertumbuhan padi musim hujan 2003-2004 disajikan pada Tabel 3. Berhubung debit dan kadar lumpur selama pertumbuhan padi bervariasi, maka sedimen yang terbawa masuk dan yang terangkut keluar areal sawah beragam. Pada saat pelumpuran, debit dan kadar lumpur air irigasi begitu juga larutan sedimen adalah yang terbesar. Namun, karena pelumpuran berlangsung hanya dalam waktu satu hari, maka sedimen yang terbawa masuk maupun yang terangkut keluar areal sawah menjadi lebih kecil jika dibandingkan dengan stadia pertumbuhan lainnya (Gambar 1). Besarnya sedimen yang terbawa masuk air irigasi saat pelumpuran berkisar antara +204 sampai +361 kg ha^{-1} dan yang terangkut keluar melalui larutan sedimen antara -491 sampai -684 kg ha^{-1} . Sebaliknya, pada stadia vegetatif yang mempunyai debit dan kadar lumpur terkecil, karena jumlah pengairan berlangsung paling lama (18 hari), maka sedimen yang terbawa masuk dan yang terangkut keluar lahan sawah adalah yang paling besar. Besarnya sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi dan yang terangkut keluar oleh larutan sedimen pada stadia vegetatif berkisar dari +1.260 sampai +2.835 kg ha^{-1} dan dari -774 sampai -1.870 kg ha^{-1} .

Mengacu pada pergerakan sedimen yang terbawa masuk dan yang terangkut keluar selama pertumbuhan dan perkembangan tanaman padi, hanya pada saat pelumpuran menunjukkan neraca



Gambar 1. Sedimen yang terdeposisi (sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi lebih besar dari yang terangkut keluar oleh larutan sedimen) dan yang hilang (sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi lebih kecil dari yang terangkut keluar oleh larutan sedimen) pada sistem sawah berteras selama pertumbuhan padi, MH 2003-2004

Figure 1. Deposited sediment (incoming sediment was higher than outgoing sediment) and removed sediment (incoming sediment was lower than outgoing sediment) at terraced paddy fields system during rice growth in the WS 2003-2004

yang negatif (Gambar 1). Hal ini mengindikasikan bahwa pada saat pelumpuran, erosi (*tillage rosion*) lebih besar dari deposisi (*deposition rate*).

Banyaknya tanah yang tererosi berkisar antara 239 sampai 480 kg ha⁻¹ musim⁻¹. Kecenderungan yang sama dilaporkan oleh Sukristiyonubowo (2008). Sebaliknya, pada stadia lainnya (tanam, vegetatif dan generatif) deposisi berlangsung lebih besar dibandingkan dengan erosi. Ini berarti bahwa sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi lebih besar dari pada yang terangkut

keluar, sehingga terjadi penambahan sedimen pada lahan sawah. Banyaknya sedimen yang terdeposisi selama siklus hidup tanaman padi berkisar antara 647 sampai 1.589 kg ha⁻¹ musim⁻¹. Data ini juga menunjukkan bahwa ada fungsi lain (*external services*) dari sistem sawah berteras yang diberikan terhadap lingkungan, yaitu dalam mengurangi efek negatif kawasan bawah (*reducing negative impact of downstream*) yang berupa sedimentasi/ pendangkalan waduk, penurunan kualitas air, dan lain sebagainya. Dari pembahasan ini dapat ditarik

suatu kesimpulan bahwa selama pertumbuhan dan perkembangan padi, erosi hanya terjadi saat pelumpuran dan besar tanah yang hilang (*soil loss*) berkisar antara 239 sampai 480 kg ha⁻¹ musim⁻¹. Sedangkan mulai tanam sampai stadia generatif, sedimen terdeposisi pada lahan sawah yang besarnya (setelah dikurangi dengan tanah yang tererosi saat pelumpuran) bervariasi dari 647 sampai 1.589 t ha⁻¹ musim⁻¹ dan antar perlakuan tidak menunjukkan beda yang nyata.

Mobilitas hara tanaman selama pertumbuhan dan perkembangan tanaman padi

Seperti halnya sedimen, mobilitas hara diamati selama pertumbuhan padi, mulai dari saat pelumpuran sampai dengan akhir stadia pertumbuhan generatif. Untuk menghitung hara yang masuk dan keluar lahan sawah, data seperti konsentrasi hara terlarut pada air irigasi dan larutan sedimen digunakan, selain volume air irigasi dan larutan sedimen.

Konsentrasi hara terlarut pada air irigasi dan larutan sedimen

Pada umumnya variasi konsentrasi nitrat (N-NO₃⁻), amonium (N-NH₄⁺), fosfat (PO₄⁻) dan kalium (K⁺) pada air irigasi adalah tidak besar (Tabel 4). Meningkatnya konsentrasi NO₃⁻ dan NH₄⁺ pada pengamatan setelah pemupukan dan menjadikannya yang tertinggi, yaitu NO₃⁻ antara 0,56 sampai 1,22 mg kg⁻¹ dan NH₄⁺ antara 1,77 sampai 1,98 mg kg⁻¹ menimbulkan dugaan adanya pengkayaan (*enrichment*) oleh faktor luar. Dugaan tersebut mengilustrasikan adanya pupuk N yang tercuci dan atau terbawanya hasil-hasil dekomposisi dari kawasan atas (*upstream*) dalam air irigasi. Kemungkinan lainnya adalah pengkayaan N-NO₃⁻ dan N-NH₄⁺ oleh air hujan. Seperti dilaporkan oleh Demyttenaere (1991), Poss and Saragoni (1992), dan Sukristiyonubowo (2007) bahwa air hujan mengandung N yang relatif tinggi.

Kecenderungan hasil yang sama ditunjukkan oleh larutan sedimen pada semua perlakuan yang diuji. Variasi konsentrasi nitrat (NO₃⁻), amonium (NH₄⁺), fosfat (PO₄⁻) dan kalium (K⁺) pada larutan sedimen adalah tidak besar (Tabel 5). Seperti halnya pada air irigasi, konsentrasi NO₃⁻ dan NH₄⁺ tertinggi dijumpai pada saat setelah pemupukan. Peristiwa ini membuktikan juga bahwa pupuk N yang diberikan di sawah (*on site*), tercuci dan terangkut keluar bersama larutan sedimen. Besarnya konsentrasi nitrat (NO₃⁻) terlarut setelah pemupukan bervariasi antara 0,80 ± 0,04 sampai 1,15 ± 0,04 mg kg⁻¹ dan untuk amonium (NH₄⁺) terlarut 1,68 ± 0,04 mg kg⁻¹, tergantung pada perlakuannya.

Konsentrasi PO₄⁻ terlarut pada air irigasi tergolong sangat rendah, bervariasi antara 0,01 sampai 0,12 mg kg⁻¹. Fenomena yang sama ditunjukkan juga pada larutan sedimen, sekalipun pada perlakuan IT dan IT+RS yang menambahkan pupuk P sebesar 100 kg TSP ha⁻¹ musim⁻¹. Pada semua perlakuan baik yang memberi pupuk P (IT dan IT+RS) maupun yang tidak (FP dan FP+RS), konsentrasi PO₄⁻ pada pengamatan setelah pemupukan relatif sama besarnya, yaitu antara 0,06 sampai 0,09 mg kg⁻¹ (Tabel 5). Kejadian ini menunjukkan bahwa pupuk P lebih tahan terhadap pencucian dibandingkan dengan pupuk N, atau mungkin P lebih banyak terfiksasi dalam bentuk Al-P dan Fe-P karena pH tanahnya berkisar antara 5,0 sampai 5,6. Oleh sebab itu, sangat menarik untuk mengevaluasi P yang terkandung dalam sedimen, yang terdiri atas butiran-butiran halus sampai sangat halus (*clay texture*).

Diantara hara yang terlarut, konsentrasi K⁺ terlarut baik pada air irigasi maupun larutan sedimen tergolong tinggi, yang bervariasi dari 1,86 ± 0,04 sampai dengan 2,34 ± 0,04 mg kg⁻¹ untuk air irigasi (Tabel 4) dan dari 1,13 ± 0,02 sampai dengan 2,21 ± 0,05 mg kg⁻¹ untuk larutan sedimen (Tabel 5). Seperti dilaporkan oleh Sukristiyonubowo (2007) pemupukan yang dilakukan oleh perkebunan teh (*Camelia sinensis*), kopi (*Coffea arabica*), cengkeh (*Eugenia aromatica*) dan rambutan (*Nephelium lapa-ceum*) di kawasan atas berpengaruh nyata terhadap

Tabel 4. Konsentrasi N, P, dan K terlarut yang terbawa masuk oleh air irigasi selama pertumbuhan padi, MH 2003-2004*Table 4. Concentration of dissolved N, P, and K in irrigation water during rice growth in the WS 2003-2004*

Perlakuan/pengamatan	Konsentrasi N, P, dan K pada air irigasi			
	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ⁻	K ⁺
	 mg kg ⁻¹			
Pelumpuran				
FP	0,10 ± 0,006 a	1,01 ± 0,025 b	0,01 ± 0,00 a	1,86 ± 0,04 a
FP + RS	0,30 ± 0,012 a	1,46 ± 0,012 a	0,07 ± 0,01 a	2,34 ± 0,04 b
IT	0,15 ± 0,006 a	1,03 ± 0,015 b	0,02 ± 0,01 a	1,79 ± 0,05 a
IT + RS	0,20 ± 0,010 a	1,07 ± 0,025 b	0,01 ± 0,01 a	1,80 ± 0,04 a
Sebelum tanam				
FP	0,15 ± 0,030 a	1,58 ± 0,065 b	0,03 ± 0,01 a	1,86 ± 0,04 a
FP + RS	0,14 ± 0,020 a	1,59 ± 0,045 b	0,04 ± 0,01 a	1,79 ± 0,05 a
IT	0,12 ± 0,015 a	1,65 ± 0,050 b	0,08 ± 0,01 a	1,72 ± 0,04 b
IT + RS	0,15 ± 0,030 a	1,76 ± 0,035 a	0,04 ± 0,02 a	1,79 ± 0,05 a
Stadia vegetatif				
• Sebelum pemupukan				
FP	0,29 ± 0,025 b	1,28 ± 0,012 a	0,12 ± 0,03 a	1,95 ± 0,02 a
FP + RS	0,45 ± 0,025 b	1,21 ± 0,030 b	0,09 ± 0,02 a	2,01 ± 0,04 a
IT	0,65 ± 0,015 a	1,18 ± 0,012 b	0,09 ± 0,01 a	2,02 ± 0,02 a
IT + RS	0,45 ± 0,025 b	1,19 ± 0,010 b	0,08 ± 0,01 a	1,86 ± 0,04 b
• Setelah pemupukan				
FP	0,70 ± 0,021 c	1,77 ± 0,055 b	0,07 ± 0,01 a	2,04 ± 0,06 b
FP + RS	0,56 ± 0,035 d	1,84 ± 0,035 b	0,07 ± 0,01 a	2,14 ± 0,06 b
IT	1,22 ± 0,030 a	1,78 ± 0,035 b	0,10 ± 0,01 a	2,16 ± 0,05 b
IT + RS	0,83 ± 0,030 b	1,98 ± 0,015 a	0,08 ± 0,01 a	2,34 ± 0,04 a
Stadia generatif				
FP	0,36 ± 0,030 b	1,65 ± 0,025 a	0,03 ± 0,01 a	1,86 ± 0,04 a
FP + RS	0,36 ± 0,006 b	1,59 ± 0,025 a	0,04 ± 0,01 a	1,79 ± 0,05 a
IT	0,47 ± 0,015 a	1,66 ± 0,030 a	0,07 ± 0,02 a	1,72 ± 0,03 b
IT + RS	0,44 ± 0,035 a	1,67 ± 0,025 a	0,04 ± 0,01 a	1,84 ± 0,02 a

*) Angka pada kolom yang sama untuk pengamatan yang sama yang diikuti huruf yang sama tidak berbeda nyata pada *Duncan Multiple Range Test* dengan selang kepercayaan 5%

konsentrasi hara terlarut yang dibawa oleh air irigasi, selain tercucinya hasil dekomposisi seresah (*litter*) dan bahan organik lainnya. Tingginya konsentrasi K⁺ terlarut pada air irigasi juga telah banyak dibahas dan dilaporkan oleh peneliti peneliti terdahulu (Uexkull, 1970; Sukristiyonubowo, 2007).

Selanjutnya, tingginya konsentrasi K⁺ terlarut pada larutan sedimen (*runoff sediment*) lebih dipengaruhi oleh tererosinya pupuk KCl (terutama pada perlakuan IT dan IT + RS yang memberi 100 kg KCl ha⁻¹ musim⁻¹) dan tercucinya hasil dekomposisi jerami (terutama pada perlakuan FP + RS dan IT + RS). Hal ini terdeteksi pada pengamatan setelah

pemupukan yang memperlihatkan konsentrasi K⁺ terlarut tertinggi.

Selain karena perbedaan konsentrasi N-NO₃⁻, N-NH₄⁺, PO₄⁻ dan K⁺ terlarut antara air irigasi dan larutan sedimen, faktor lain seperti debit, pemupukan, curah hujan dan ukuran teras juga akan berpengaruh terhadap deposit atau tererosinya hara seperti yang dilaporkan dalam Sukristiyonubowo (2007). Penelitian lebih rinci dan mendalam mengenai sistem sawah berteras pada musim kemarau menjadi sangat penting untuk menggali informasi mengenai fungsi lain dari sistem sawah berteras, yang tidak hanya sekedar media penghasil beras.

Tabel 5. Konsentrasi N, P, dan K terlarut yang terangkut keluar oleh larutan sedimen selama pertumbuhan padi, MH 2003-2004*Table 5. Concentration of dissolved N, P, and K in suspended sediment during rice growth, WS 2003-2004*

Perlakuan/pengamatan	Konsentrasi N, P, dan K pada larutan sedimen			
	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ⁻	K ⁺
	 mg kg ⁻¹			
Pelumpuran				
FP	0,12 ± 0,02 b	1,05 ± 0,05 b	0,02 ± 0,01 a	1,60 ± 0,05 b
FP + RS	0,58 ± 0,09 a	1,47 ± 0,07 a	0,12 ± 0,03 a	2,21 ± 0,05 a
IT	0,17 ± 0,03 b	1,11 ± 0,07 b	0,03 ± 0,01 a	1,60 ± 0,04 b
IT + RS	0,13 ± 0,05 b	1,10 ± 0,09 b	0,05 ± 0,01 a	1,75 ± 0,02 b
Sebelum tanam				
FP	0,10 ± 0,03 a	1,47 ± 0,03 b	0,03 ± 0,01 a	1,13 ± 0,02 b
FP + RS	0,10 ± 0,02 a	1,54 ± 0,03 b	0,03 ± 0,01 a	1,38 ± 0,03 a
IT	0,10 ± 0,01 a	1,62 ± 0,02 a	0,07 ± 0,02 a	1,44 ± 0,04 a
IT + RS	0,13 ± 0,02 a	1,57 ± 0,02 b	0,04 ± 0,01 a	1,54 ± 0,04 a
Stadia vegetatif				
• Sebelum pemupukan				
FP	0,69 ± 0,03 b	1,30 ± 0,03 a	0,06 ± 0,01 a	1,67 ± 0,06 a
FP + RS	0,85 ± 0,03 a	1,31 ± 0,03 a	0,06 ± 0,02 a	1,70 ± 0,06 a
IT	0,89 ± 0,04 a	1,32 ± 0,01 a	0,04 ± 0,01 a	1,73 ± 0,05 a
IT + RS	0,80 ± 0,02 a	1,29 ± 0,03 a	0,08 ± 0,02 a	1,75 ± 0,05 a
• Setelah pemupukan				
FP	0,80 ± 0,04 c	1,69 ± 0,05 a	0,07 ± 0,02 a	1,73 ± 0,06 c
FP + RS	1,10 ± 0,05 a	1,68 ± 0,04 a	0,06 ± 0,01 a	1,85 ± 0,04 b
IT	1,15 ± 0,04 a	1,67 ± 0,06 a	0,06 ± 0,04 a	1,90 ± 0,02 b
IT + RS	0,97 ± 0,02 b	1,68 ± 0,04 a	0,09 ± 0,01 a	1,99 ± 0,04 a
Stadia generatif				
FP	0,31 ± 0,03 b	1,57 ± 0,03 b	0,03 ± 0,01 a	1,56 ± 0,03 c
FP + RS	0,34 ± 0,03 b	1,54 ± 0,03 b	0,03 ± 0,02 a	1,75 ± 0,03 b
IT	0,43 ± 0,02 a	1,57 ± 0,03 b	0,06 ± 0,01 a	1,75 ± 0,02 b
IT + RS	0,46 ± 0,02 a	1,62 ± 0,02 a	0,06 ± 0,01 a	1,95 ± 0,04 a

*) Angka pada kolom yang sama untuk pengamatan yang sama yang diikuti huruf yang sama tidak berbeda nyata pada *Duncan Multiple Range Test* dengan selang kepercayaan 5%

N, P, dan K terlarut yang terbawa masuk dan yang terangkut keluar selama pertumbuhan tanaman padi

Berhubung konsentrasi hara terlarut dan debit air irigasi dan larutan sedimen berbeda, maka hara terlarut yang terbawa masuk dan yang terangkut keluar sawah akan bervariasi. Variasi ini dapat menyebabkan neraca hara positif, apabila hara yang masuk lebih banyak dari pada yang keluar, atau negatif, apabila hara yang masuk lebih sedikit dibandingkan hara yang terangkut keluar (Tabel 6).

Seperti halnya pada pergerakan sedimen, N (NO₃⁻ + NH₄⁺), P dan K terlarut yang masuk dan yang keluar pada stadia vegetatif adalah yang terbesar. Penyebabnya adalah pengairan pada stadia

ini dilakukan lebih lama jika dibandingkan dengan saat pelumpuran (1 hari), sebelum tanam (7 hari) dan stadia generatif (8 hari). Pada stadia ini terjadi surplus hara terlarut, dimana hara terlarut yang masuk lebih besar dari pada yang keluar. Besarnya surplus hara terlarut tersebut berkisar antara 4,14 dan 9,90 kg N, 0,09 dan 1,14 kg P, dan antara 3,96 dan 8,28 kg K ha⁻¹ musim⁻¹.

Menarik untuk disimak bahwa hara terlarut yang masuk pada masing-masing stadia pertumbuhan padi adalah lebih besar dibandingkan dengan yang terangkut keluar oleh larutan sedimen. Akibatnya, hara tersebut tersimpan di setiap teras lahan sawah. Sukristiyonubowo (2007) menemukan bahwa teras dengan ukuran yang lebih luas

Tabel 6. N, P, dan K terlarut yang terbawa masuk oleh air irigasi dan yang terangkut keluar oleh larutan sedimen selama pertumbuhan padi, MH 2003-2004*Table 6. Incoming and outgoing dissolved N, P and K during rice growth in the WS 2003-2004*

Perlakuan/ pengamatan	Hara terlarut yang masuk			Hara terlarut yang keluar			Net input		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
..... kg ha ⁻¹ musim ⁻¹									
Pelumpuran									
FP	0,58 b*	0,002 a	1,06 a	0,36 a	0,002 a	0,55 a	0,22 a	0	0,51 a
FP + RS	1,20 a	0,020 a	1,57 a	0,86 a	0,040 b	0,93 a	0,33 a	0	0,64 a
IT	0,52 b	0,002 a	0,87 a	0,34 a	0,003 a	0,46 a	0,18 a	0	0,41 a
IT + RS	0,68 b	0,002 a	1,13 a	0,56 a	0,008 a	0,80 a	0,12 a	0	0,33 a
Sebelum tanam									
FP	4,20 a	0,060 a	4,26 a	3,06 a	0,018 a	2,64 a	1,20 a	0,018 a	1,62 a
FP + RS	6,48 a	0,060 a	6,60 a	5,64 a	0,030 a	3,90 a	0,90 a	0,030 a	2,70 a
IT	3,24 a	0,060 a	3,30 a	2,16 a	0,030 a	1,92 a	1,08 a	0,030 a	1,38 a
IT + RS	6,36 a	0,060 a	6,42 a	4,48 a	0,030 a	4,62 a	1,50 a	0,030 a	1,80 a
Stadia vegetatif									
FP	22,50 ab	0,270 a	16,20 a	12,96 a	0,126 a	10,80 a	9,90 a	0,144 a	6,84 a
FP + RS	29,52 a	0,288 a	22,86 a	19,98 a	0,162 a	14,58 a	9,54 a	0,126 a	8,28 a
IT	12,60 b	0,144 a	9,90 a	8,46 a	0,072 a	5,76 a	4,14 a	0,090 a	3,96 a
IT + RS	25,56 ab	0,270 a	20,70 a	15,66 a	0,180 a	12,42 a	9,90 a	0,090 a	8,28 a
Stadia generatif									
FP	9,50 a	0,070 a	8,40 a	7,20 a	0,040 a	6,00 a	2,30 a	0,030 a	2,40 a
FP + RS	12,50 a	0,090 a	11,00 a	10,20 a	0,050 a	9,10 a	2,30 a	0,040 a	1,80 a
IT	6,60 a	0,050 a	5,80 a	4,80 a	0,040 a	4,10 a	1,80 a	0,010 a	1,50 a
IT + RS	12,30 a	0,090 a	10,80 a	10,30 a	0,080 a	9,90 a	2,00 a	0,010 a	0,90 a
Jumlah									
FP	36,78 a	0,402 a	29,92 a	23,58 a	0,186 a	19,99 a	13,62 a	0,192 a	11,37 a
FP + RS	49,70 a	0,458 a	42,03 a	36,68 a	0,282 a	28,51 a	13,07 a	0,196 a	13,42 a
IT	22,96 a	0,256 a	19,87 a	15,76 a	0,145 a	12,24 a	7,20 a	0,130 a	7,25 a
IT + RS	44,90 a	0,422 a	39,05 a	31,32 a	0,298 a	27,74 a	13,52 a	0,130 a	11,31 a

* Angka pada kolom yang sama untuk pengamatan yang sama yang diikuti huruf yang sama tidak berbeda nyata pada Duncan Multiple Range Test dengan selang kepercayaan 5%

menyimpan hara lebih banyak dibandingkan teras yang berukuran lebih kecil. Fenomena ini juga mengindikasikan adanya pengurangan akibat negatif di kawasan bawah (*downstream*) berupa meningkatnya kualitas air. Besarnya hara terlarut yang tersimpan di lahan sawah selama pertumbuhan tanaman padi adalah 7,20 - 13,62 kg N, 0,13 - 0,20 kg P dan 7,25 - 13,42 kg K ha⁻¹ musim⁻¹ dan antar perlakuan tidak menunjukkan beda yang nyata (Tabel 6). Hasil ini dapat diartikan bahwa kontribusi nitrogen (N) dan kalium (K) dari air irigasi untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman padi adalah relatif besar, setara dengan 14-28 kg urea dan 15-25 kg KCl ha⁻¹ musim⁻¹. Sementara itu sumbangan P (fosfor) air irigasi adalah sangat kecil atau hampir tidak berarti.

KESIMPULAN

- Selama pertumbuhan padi debit air irigasi bervariasi bergantung pada penggunaan di kawasan atas dan stadia pertumbuhan padi. Debit air irigasi saat pelumpuran adalah yang terbesar, berkisar mulai $2,55 \pm 1,23$ sampai $3,10 \pm 0,55$ l detik⁻¹. Pada stadia vegetatif debit air irigasi adalah yang terkecil, yaitu antara $0,33 \pm 0,15$ dan $0,54 \pm 0,15$ l detik⁻¹, dan pada stadia generatif berkisar antara $1,38 \pm 0,28$ sampai $1,60 \pm 0,06$ l detik⁻¹. Dibandingkan dengan debit air irigasi, debit larutan sedimen adalah lebih kecil. Debit larutan sedimen saat pelumpuran berkisar dari $0,89 \pm 0,20$ sampai $1,31 \pm 0,34$ l detik⁻¹ dan pada stadia vegetatif debit larutan sedimen adalah yang terkecil, yaitu

antara $0,21 \pm 0,07$ dan $0,78 \pm 0,52$ l detik⁻¹. Pada stadia generatif bervariasi dari $1,13 \pm 0,06$ sampai $1,32 \pm 0,09$ l detik⁻¹. Kadar lumpur air irigasi bervariasi antara $0,207 \pm 0,012$ sampai $0,490 \pm 0,09$ g l⁻¹, dengan kadar lumpur tertinggi adalah saat pelumpuran. Kecenderungan yang sama diamati pada kadar lumpur larutan sedimen. Kadar lumpur larutan sedimen tertinggi adalah saat pelumpuran yang bervariasi antara $2,88 \pm 1,42$ sampai $3,58 \pm 1,13$ g l⁻¹, lebih tinggi sebesar 2,70-3,41 g l⁻¹ jika dibandingkan dengan stadia lainnya.

2. Sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi lebih kecil dari pada sedimen yang terangkut keluar oleh larutan sedimen hanya pada saat pelumpuran. Banyaknya sedimen yang tersimpan berkisar dari 647 sampai 1.589 kg ha⁻¹ musim⁻¹ dari jumlah sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi berkisar antara 2.715 sampai 5.521 kg ha⁻¹ musim⁻¹ dan antar perlakuan tidak menunjukkan beda yang nyata. Sebaliknya, hara terlarut (nitrogen, fosfor, dan kalium) yang terbawa masuk oleh air irigasi di setiap stadia pertumbuhan padi tersimpan di sawah. Jumlah hara terlarut yang tersimpan di lahan sawah selama pertumbuhan tanaman padi adalah 7,20-13,62 kg N, 0,13-0,20 kg P, dan 7,25-13,42 kg K ha⁻¹ musim⁻¹, setara dengan 14-28 kg urea dan 15-25 kg KCl ha⁻¹ musim⁻¹ dan secara statistik antar perlakuan tidak menunjukkan beda nyata. Hasil ini mendemonstrasikan adanya fungsi lain (*external services*) yang diberikan oleh sistem sawah berteras, selain sebagai tempat memproduksi beras.

DAFTAR PUSTAKA

- Adachi, K. 1990.** Effect of rice-soil puddling on water percolation. Pp 146-151. *In* Proceedings of the transactions of the 14th International Congress on Soil Science I.
- Agus, F. and Sukristiyonubowo. 2003.** Nutrient loss and onsite cost of soil erosion under different land uses systems in South East Asia. Pp 186-193. *In* Wani, S.P., Maglinao, A.R., Ramakrisna, A., and Rego, T.J. (Eds.), Integrated catchment management for land and water conservation and sustainable agricultural production in Asia.
- Agus, F., T. Vadari, R.L. Watung, Sukristiyonubowo, and C. Valentin. 2003.** Effects of land use and management systems on water and sediment yields: Evaluation from several micro catchments in Southeast Asia. Pp 135-149. *In*: Maglinao, A.R., Valentin, C., and Penning de Vries, F.W.T. (Eds.), From soil research to land and water management: Harmonising People and Nature. Proceedings of the IWMI-ADB Project Annual Meeting and 7th MSEC Assembly.
- Aksoy, H., and H.L. Kavvas. 2005.** A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport model. *Catena*. 64:247-271.
- Alberts, E.E., G.E. Schuman, and R.E. Burwell. 1978.** Seasonal runoff losses of nitrogen and phosphorus from Missouri Valley loess watershed. *Journal of Environmental Quality* 7:203-208.
- Anbumozhi, V., E. Yamaji, and T. Tabuchi. 1998.** Rice crop growth and yield as influenced by changes in ponding water depth, water regime and fertigation level. *Agricultural Water Management* 37:241-253.
- Anonim. 1977.** Bercocok tanam padi, palawijo dan sayur. BIMAS, Departemen Pertanian. 280 hlm.
- Anonim. 2007.** Rekomendasi pemupukan N, P dan K pada padi sawah spesifik lokasi. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian. 286 hlm.
- Bhagat, R.M., S.I. Bhuiyan, and K. Moody. 1996.** Water, tillage and weed interactions in lowland tropical rice: a review. *Agricultural Water Management* 31:165-184.
- Bhuiyan, S.I. 1992.** Water management in relation to crop production: case study on rice. *Outlook Agriculture*. 21:293-299.
- Bhuiyan, S.I., M.A. Sattar, and D.F. Tabbal. 1994.** Wet seeded rice: water use efficiency, productivity and constraints to wider adoption. Paper presented at the International Workshop on constraints, opportunities, and innovations for wet seeded rice, Bangkok, May 31-June 3, 1994, 19 p.

- Bouman, B.A.M., S. Peng, A.R. Castaneda, and R.M. Visperas. 2005.** Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems. *Agricultural Water Management* 74:87-105
- Bouman, B.A.M., and T.P. Tuong. 2001.** Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agricultural Water Management* 49:11-30.
- BPS. 2002.** Statistik Indonesia. Biro Pusat Statistik.
- Cabangon, R.J., and T.P. Tuong. 2000.** Management of cracked soils for water saving during land preparation for rice cultivation. *Soil and Tillage Research* 56: 105-116.
- Cabangon, R.J., T.P. Tuong, and N.B. Abdullah. 2002.** Comparing water input and water productivity of transplanted and direct-seeded rice production systems. *Agricultural Water Management*. 57:11-31.
- Daniels, T.C., A.N. Sharpley, and J.L. Lemunyon. 1998.** Agricultural phosphorus and eutrophication a symposium overview. *Journal of Environmental Quality* 27:251-257.
- De Datta, S.K. 1981.** Principles and Practises of Rics Production. IRRI. Los Banos, Phillipines, P618.
- Demyttenaere, P. 1991.** Stikstofdynamiek in de bodems van de westvlaamse groentestreek. Doctorate Thesis. 203 p.
- Douglas, Jr. C.L., K.A. King, and J.F. Zuzel. 1998.** Nitrogen and phosphorus in surface runoff and sediment from a wheat-pea rotation in Northeastern Oregon. *Journal of Environmental Quality* 27:1170-1177.
- Duque Sr, C.M., R.O. Ilao, L.E. Tiongco, R.S. Quita, N.V. Carpina, B. Santos, and T. de Guzman. 2003.** Management of soil erosion consortium: An innovative approach to sustainable land management in the Philippines. MSEC-Philippines Annual Report. *In: Wani, S.P., Maglinoa, A.R, Ramakrisna, A., and Rego, T.J. (Eds.), Integrated catchment management for land and water conservation and sustainable agricultural production in Asia. CD-Rom (one CD).*
- El-Swaify, S.A. 1989.** Monitoring of weather, runoff, and soil loss. Pp 163-178. *In Soil management and smallholder development in the Pacific Islands. IBSRAM-Thailand proceedings.*
- Ghildyal, B.P. 1971.** Soil and water management for increased water and fertiliser use efficiency for rice production. Pp 499-509 *In Kanwar, J.S., Datta, N.P., Bains, S.S., Bhumbra, D.R., and Biswas, T.D. (Eds.), Proceedings of international symposium on soil fertility evaluation.*
- Hashyim, G.M., K.J. Caughlan, and J.K. Syers. 1998.** On-site nutrient depletion: An effect and a cause of soil erosion. Pp. 207-222. *In: Penning de Vries, F.W.T., Agus, F., and Kerr, J. (Eds.), Soil Erosion at Multiple Scale. Principles and Methods for Assessing Causes and Impacts. CABI Publishing in Association with IBSRAM.*
- IWMI (International Water Management Institute). 2004.** Water facts. IWMI Brochure.
- Kirchhof, G., S. Priyono, W.H. Utomo, T. Adisarwanto, E.V. Dacanay, and H.B. So. 2000.** The effect of soil puddling on the soil physical properties and the growth of rice and post-rice crops. *Soil and Tillage Research* 56:37-50.
- Kissel, D.E., C.W. Richardson, and E. Burnett. 1976.** Losses of nitrogen in surface runoff in the Black Prairie of Texas. *Journal of Environmental Quality* 5:288-293.
- Kukul, S.S., and A.S. Sidhu. 2004.** Percolation losses of water in relation to pre-puddling tillage and puddling intensity in a puddle sandy loam rice (*Oryza sativa* L.) field. *Soil and Tillage Research* 78:1-8.
- Lal, R. 1998.** Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Reviews in Plant Sciences* 17(4):319-464.
- Lal, R., F.P. Miller, and T.J. Logan. 1998.** Are intensive agricultural practices environmentally and ethically sound? *Journal of Agriculture Ethics* 1:193-210.
- Naphade, J.D., and B.P. Ghildyal. 1971.** Influences of puddling and water regimes on soil characteristics, ion uptake and rice growth. Pp 510-517. *In Kanwar, J.S., Datta, N.P., Bains, S.S., Bhumbra, D.R., and Biswas, T.D. (Eds.), Proceedings of international symposium on soil fertility evaluation.*
- Phommassack, T., A. Chanthavongsa, C. Sihavong, C. Thonglatsamy, C. Valentine, A. de Rouw, P. Marchand, and V. Chaplot. 2003.** An innovative approach to sustainable land management in Lao PDR. MSEC-Lao PDR Annual Report. *In Wani, S.P., Maglinoa, A.R, Ramakrisna, A., and Rego, T.J. (Eds.),*

Integrated catchment management for land and water conservation and sustainable agricultural production in Asia. CD-Rom (one CD).

Poss, R., and H. Saragoni. 1992. Leaching of nitrate, calcium and magnesium under maize cultivation on an oxisol in Togo. *Fertilizer Research* 33(2):123-133.

Robichaud, P.R., T.R. Lillybridge, and J.W. Wagenbrenner. 2006. Effect of post fire seeding and fertilising on hill slope erosion in north-central Washington, USA. *Catena*. 67: 56-67.

Sanchez, P.A. 1973. Puddling tropical rice soils: 1. Growth and nutritional aspects. *Soil Science* 115:303-308.

Schuman, G.E. and R.E. Burwell. 1974. Precipitation nitrogen contribution relative to surface runoff discharge. *Journal of Environmental Quality*. 4:366-369.

Sharma, P.K., and S.K. De Datta. 1986. Physical properties and processes of puddled rice soils. *Advance Soil Science*. 5:139-178.

Sukristiyonubowo, R.L. Watung, T. Vadari, and F. Agus. 2003. Nutrient loss and the on-site cost of soil erosion under different land use systems. Pp. 151-164. *In* Maglinao, A.R, Valentin, C., and Penning de Vries, F.W.T. (Eds.), *From soil research to land and water management: Harmonising People and Nature. Proceedings of the IWMI-ADB Project Annual Meeting and 7th MSEC Assembly.*

Sukristiyonubowo, F. Agus, D. Gabriels, and M. Verloo. 2004. Sediment and nutrient balances under traditional irrigation at terraced paddy field systems. Paper presented at the second International Symposium on Land Use Change and Soil and Water processes in Tropical Mountain Environments held in Luang Prabang, Lao PDR on 14-17 December 2004. Organised by Ministry of Agriculture and Forestry, Lao PDR and sponsored by National Agriculture and Forestry Research Institute (NAFRI), International Water Management Institute (IWMI) and Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

Sukristiyonubowo. 2007. Nutrient balances in terraced paddy fields under traditional

irrigation in Indonesia. PhD thesis. Faculty of Bioscience Engineering, Ghent University, Ghent, Belgium, 184 p.

Sukristiyonubowo. 2008. Sedimen dan unsur hara yang terangkut saat pengolahan tanah pada sawah berteras. Hlm 225-245. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian. Departemen Pertanian.

Taball, D.F., B.A.M. Bouman, S.I. Bhuiyan, E.B. Sibayan, and M.A. Sattar. 2002. On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice; case study in the Philippines. *Agricultural Water Management*. 56:93-112.

Toan, T.D., T. Phien, D.D. Phai, and L. Nguyen. 2003. Managing soil erosion for sustainable agriculture in Dong Cao Catchment. MSEC-Vietnam Annual Report. *In* Wani, S.P., Maglinao, A.R, Ramakrisna, A., and Rego, T.J. (Eds.), *Integrated catchment management for land and water conservation and sustainable agricultural production in Asia. CD-Rom (one CD).*

Udawatta, R.P., P.P. Motavalli, H.E. Garrett, and J.J. Krstansky. 2006. Nitrogen losses in runoff from three adjacent agricultural watersheds with clay pan soils. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 117:39-48.

Uexkull, V.H.R. 1970. Some notes on the timing of potash fertilisation of rice (nitrogen-potash balance in rice nutrition). Pp. 413-416. *In* The International Potash Institute (Eds.). *Proceedings of the 9th congress of the International Potash Institute.*

Visser, S.M., L. Stroosnijder, and W.J. Chardon. 2005. Nutrient losses by wind and water, measurements and modelling. *Catena*. 64: 1-22.

WMO (World Meteorological Organisation). 1994. Guide to hydrological practices. Data acquisition and processing, analysis, forecasting and other applications. Fifth ed. WMO-No.168. 735 p.

Yuqian, L. 1989. Manual on operational methods for the measurement of sediment transport. Operational Hydrology Report No.29. WMO-No. 686. 169p.