

Variasi Sewaktu dan Musiman Pergerakan Sedimen pada Sistem Sawah Berteras

Temporal and Seasonal Variation of Sediment Movement in the Terraced Paddy Fields System

SUKRISTIYONUBOWO DAN D. SETYORINI¹

ABSTRAK

Variasi sewaktu dan musiman pergerakan sedimen pada sistem sawah berteras telah dipelajari di Desa Keji, Kabupaten Semarang untuk Musim Hujan 2003-04 dan Musim Kemarau 2004. Dua belas sawah berteras yang berbeda jumlah dan ukuran terasnya digunakan dalam penelitian ini. Tujuan penelitian adalah mempelajari variasi sewaktu dan musiman pergerakan sedimen selama pertumbuhan tanaman padi pada musim hujan dan musim kemarau. Pengamatan dilakukan pada empat perlakuan yang diuji, yaitu Praktek Petani, Praktek Petani + Jerami, Perbaikan Teknologi dan Perbaikan Teknologi + Jerami. Pengambilan contoh dan pengukuran debit air irigasi dan larutan sedimen dilaksanakan saat pengolahan tanah, fase tanam, fase vegetatif, dan fase generatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa debit dan konsentrasi sedimen sewaktu air irigasi dan larutan sedimen tertinggi diamati pada fase pelumpuran dan berbeda nyata dibandingkan fase pertumbuhan tanaman padi berikutnya. Sebaliknya, debit dan konsentrasi sedimen sewaktu terendah terjadi pada fase vegetatif. Debit dan konsentrasi sedimen musiman air irigasi dan larutan sedimen pada musim hujan lebih tinggi dari pada musim kemarau. Sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi dan yang terangkut keluar melalui larutan sedimen sewaktu tertinggi, baik musim hujan dan musim kemarau, ditemukan pada fase vegetatif dan berbeda nyata dibandingkan dengan saat pelumpuran, tanam, dan fase generatif. Besarnya sedimen musiman yang terbawa masuk adalah 4.422 ± 361 dan $1.779 \pm 126 \text{ kg ha}^{-1}$ dan yang terangkut keluar adalah 3.345 ± 258 dan $1.400 \pm 113 \text{ kg ha}^{-1}$ masing-masing untuk musim hujan dan musim kemarau. Selisih positif dari sedimen yang terbawa dengan yang terangkut keluar mendemonstrasikan fungsi lingkungan dari sistem sawah berteras.

Kata kunci : Variasi sewaktu, Musiman, Sedimen debit, Kadar lumpur, Sawah, Teras

ABSTRACT

Temporal and seasonal variation of sediment movement in terraced paddy fields has been studied at Keji Village, in Semarang District for the Wet Season 2003-04 and the Dry Season 2004. Twelve terraced paddy fields with different number and size of terraces were used in this research, corresponding to four treatments and three replications. Terraces were flat, different in size, and descending to the river. The objective was to study the temporal and seasonal variations of sediment movement during rice growth in the wet season and the dry season. Measurements were conducted in the four treatments being tested including Farmer Practices, Farmer Practices + Rice Straw, Improved Technology, and Improved Technology + Rice Straw. Sampling and measuring of irrigation water discharge and suspended sediment were carried out at puddling, before planting, vegetative stage, and at generative stage. The highest temporal discharge as well as sediment

concentration of irrigation water and suspended sediment both in wet and dry seasons were observed at the puddling stage and significantly different with the following rice growth stages. In contrast, the lowest temporal discharge and sediment concentration were found at the vegetative stage. Seasonal discharge and sediment concentration of irrigation water and suspended sediment in wet season were higher than in dry season. The highest incoming and outgoing sediments both in wet and dry season were observed at the vegetative stage and significantly different at generative stage, planting and puddling. The amount of seasonal incoming sediment were $4,422 \pm 361$ and $1,779 \pm 126 \text{ kg ha}^{-1}$ and the outgoing sediment were $3,345 \pm 258$ and $1,400 \pm 113 \text{ kg ha}^{-1}$ for the wet season 2003-04 and dry season 2004, respectively. The surplus of incoming sediment by outgoing sediment demonstrates the environmental services provided by terraced paddy fields system.

Keywords : Temporal, Seasonal, Sediment discharge, Sediment concentration, Paddy field, Terrace

PENDAHULUAN

Penelitian pada sistem sawah berteras belum banyak dikerjakan. Selama ini penelitian pada lahan basah (*wetland*) diprioritaskan pada lahan sawah beririgasi teknis. Semakin berkurangnya areal pertanaman padi dan luas panen sebagai akibat dari meningkatnya (a) alih fungsi lahan pertanian, (b) kompetisi kebutuhan air antara sektor pertanian, industri dan rumah tangga, dan (c) pencemaran air, telah menurunkan total produksi padi di banyak negara penghasil beras (Baghat *et al.*, 1996; Bouman and Tuong, 2001; BPS, 2002). Untuk itu, penelitian pada sistem sawah berteras perlu mendapatkan perhatian guna membantu memenuhi target tambahan produksi padi kurang lebih dua juta ton setiap tahunnya dan menjaga ketahanan beras nasional.

Diakui bahwa penanaman padi lahan basah membutuhkan banyak air dan paling tidak efisien dibanding tanaman biji-bijian lainnya. Pada budidaya sawah, air diberikan mulai dari fase penjemuran

¹ Peneliti pada Balai Penelitian Tanah, Bogor.

tanah (*land soaking*) sampai dengan akhir fase pertumbuhan generatif secara berlebihan tanpa memperhatikan debit airnya (Anonim, 1977; Sukristiyonubowo, 2007). Akibatnya produktivitas air pada budidaya sawah tergolong rendah dan lebih rendah jika dibandingkan tanaman biji-bijian lainnya. Penelitian yang dilakukan di India dan Filipina menunjukkan bahwa produktivitas air (*water productivity*) pada budidaya padi sawah berkisar antara 0,14 - 1,10 g gabah kg⁻¹ air (Bhuiyan, 1992; Bhuiyan *et al.*, 1994; Bouman and Tuong, 2001; 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).

Pengairan tradisional pada sistem sawah berteras dilakukan dengan membuka dan menutup saluran air masuk dan saluran air keluar. Cara ini memungkinkan sedimen dan unsur hara terbawa masuk melalui air irigasi dan terangkut keluar areal persawahan melalui pergerakan larutan sedimen. Dengan demikian, penelitian mengenai pergerakan sedimen, hara tanaman, dan variasinya baik sewaktu maupun musiman selama siklus hidup padi sangat penting untuk dipelajari. Penelitian yang telah dilakukan di sawah beririgasi, baik teknis maupun semi teknis, banyak mempelajari hubungan antara pelumpuran dengan sifat fisik tanah, sifat kimia tanah, dan hasil padi (Ghildyal, 1971; Naphade and Ghildyal, 1971; Sanchez, 1973; Adachi, 1990; Cabangon and Tuong, 2000; Kirchhof *et al.*, 2000; Kukal and Sidhu, 2004; Sharma *et al.*, 2005). Penelitian yang menyangkut pergerakan sedimen dan kaitannya dengan kualitas air di kawasan bawah (*down stream*) belum dilakukan.

Dilaporkan bahwa sedimen dan 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 (Agus dan Sukristiyonubowo, 2003; Aksoy and Kavvas, 2005; Duque *et al.*, 2003; Lal, 1998; Lal *et al.*, 1998; Phomassack *et al.*, 2003; Sojka *et al.*, 1992;

Sukristiyonubowo, 2007, 2008a, 2008b; Sukristiyonubowo *et al.*, 2004 dan 2003; Toan *et al.*, 2003; Uexkull, 1989; Visser *et al.*, 2005). Selanjutnya, dilaporkan juga bahwa iklim, tanah, topografi lahan, tipe penggunaan lahan, dan cara pengelolaan lahan dan tanaman berpengaruh besar terhadap banyak sedimen dan hara yang terangkut (Agus *et al.*, 2003; Lal, 1998; Lal *et al.*, 1998; Robichaud *et al.*, 2006; Sukristiyonubowo *et al.*, 2003; Sukristiyonubowo, 2007; Udawatta *et al.*, 2006).

Sukristiyonubowo (2007; 2008a; 2008b) mengamati adanya variasi yang besar pada kadar lumpur dan debit air, baik air irigasi maupun larutan sedimen, selama pertumbuhan padi di musim hujan. Bergantung pada fase pertumbuhan padi, variasi debit air irigasi antara $0,33 \pm 0,15$ dan $3,10 \pm 0,55$ liter detik⁻¹, sementara untuk larutan sedimen (*suspended sediment*) dari $0,21 \pm 0,17$ sampai $1,32 \pm 0,09$ liter detik⁻¹. Selanjutnya, kadar lumpur air irigasi berkisar antara $0,207 \pm 0,015$ $0,490 \pm 0,09$ g l⁻¹ dan untuk larutan sedimen mulai dari $0,170 \pm 0,017$ sampai dengan $3,580 \pm 1,13$ g l⁻¹. Variasi ini akan menyebabkan sedimen yang terangkut dari lahan sawah berteras antar waktu di dalam satu musim maupun antara musim berbeda. Lebih tingginya beban aktivitas agronomis (*agricultural activities load*) di musim hujan diduga juga akan berpengaruh terhadap sedimen yang terangkut. Dengan demikian, menarik untuk dipelajari pengaruh antar waktu dan musim terhadap sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi dan yang terangkut melalui larutan sedimen (*runoff sediment*). Penelitian ini membahas variasi sewaktu dan musiman pergerakan sedimen selama pertumbuhan tanaman padi pada musim hujan 2003-04 (MH 2003-04) dan musim kemarau 2004 (MK 2004).

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilaksanakan di Desa Keji, Kecamatan Ungaran, Kabupaten Semarang pada MH 2003-04 dan MK 2004 pada ketinggian antara 390-510 m di atas permukaan laut dengan rata-rata curah

hujan tahunan 3.140 mm. Dua belas sawah berteras, yang berbeda jumlah teras dan luasannya digunakan dalam penelitian ini (Tabel 1). Teras bersifat datar, berlainan ukuran, dan tersusun dari atas ke bawah menuju sungai. Setiap teras mempunyai satu saluran air masuk dan satu saluran air keluar. Saluran air masuk, dimana air irigasi masuk ke lahan sawah, terletak pada teras paling atas dan disebut saluran air masuk utama (*main inlet*). Sementara, saluran air keluar, dimana larutan sedimen (*runoff sediment*) mengalir menuju ke sungai, terletak pada teras paling bawah dan disebut saluran air keluar utama (*main outlet*).

Pengamatan dilakukan pada perlakuan (1) Praktek Petani (FP), (2) Praktek Petani + Jerami (FP+RS), (3) Perbaikan Teknologi (IT) dan (4) Perbaikan Teknologi + Jerami (IT+RS), yang merupakan perlakuan untuk penelitian keseimbangan hara (*nutrient balance*). Masing-masing perlakuan diulang tiga kali. Jerami yang dikembalikan ke sawah adalah 33% ha⁻¹ musim⁻¹ dari total produksi jerami pada musim sebelumnya, karena 67% dari produksi jerami digunakan untuk pakan ternak sapi. Pada perlakuan FP, petani hanya memberi urea saja sebanyak 50 kg ha⁻¹ musim⁻¹, sedangkan dosis pemupukan pada perlakuan IT dan IT+RS adalah 100 kg urea, 100 kg TSP, dan 100 kg KCl ha⁻¹ musim⁻¹.

Pelumpuran MH 2003-04 dilakukan antara Desember 2003 dan Januari 2004, sementara untuk MK 2004 dilaksanakan Mei 2007. Penanaman dengan cara pemindahan (*transplanting*) dilakukan pada Januari 2004 untuk MH 2003-04 dan mulai Mei 2004 sampai Juni 2004 untuk MK 2004. Bibit padi umur 21 hari dipindahkan dengan jarak tanam 25 x 25 cm.

Pupuk urea diberikan dua kali masing-masing setengah dosis, yaitu pada umur 21 and 35 HST (Hari Setelah Tanam), sedangkan TSP dan KCl diberikan sekali pada umur 21 HST. Banyaknya pupuk yang diberikan setiap teras dihitung berdasarkan dosis pupuk per hektar dikalikan dengan

ratio antara jumlah tanaman per teras dengan jumlah tanaman per hektar.

Tabel 1. Karakteristik lahan sawah yang digunakan untuk penelitian

Table 1. The characteristic of paddy fields used for experiment

Perlakuan	Ulangan	Jumlah teras	Luas m ²
IT + RS	I	9	2.240
	II	8	1.530
	III	4	3.400
IT	I	7	5.000
	II	7	4.500
	III	8	3.070
FP + RS	I	8	904
	II	5	2.500
	III	7	5.300
FP	I	9	5.040
	II	8	4.780
	III	6	1.680

Sumber : Sukristiyonubowo, 2007 (diolah kembali)

Pengambilan contoh air irigasi dan pengukuran debit air irigasi dilakukan pada saluran air masuk utama dan untuk larutan sedimen pada saluran air keluar utama. Pengamatan dikerjakan selama pertumbuhan tanaman padi, mulai dari tahap pelumpuran sampai dengan fase generatif, karena setelah fase generatif air irigasi tidak ditambahkan lagi. Lama pengairan berlangsung, mulai dari pembukaan saluran air masuk utama dan air keluar utama sampai penutupan kembali, juga dicatat. Data ini diperlukan untuk menghitung volume air irigasi dan larutan sedimen, yang kemudian untuk menghitung sedimen yang terbawa masuk dan yang terangkut keluar lahan sawah. Prosedur dan rumus untuk menghitung sedimen yang masuk dan yang keluar, sebagai berikut (Sukristiyonubowo. 2007; 2008a; 2008b) :

- Debit air irigasi yang diukur dengan menggunakan *Floating Method with stopwatch* dihitung berdasarkan formula di bawah ini :

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

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 m³ ke l

- Debit larutan sedimen yang diukur dengan *bucket method* dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Q = 11/t$$

dimana :

Q = Debit (l detik⁻¹)

t = Waktu untuk mencapai 11 liter (detik)

- Selanjutnya, sedimen yang masuk atau keluar dihitung berdasar formula :

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

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

Setiap pengambilan contoh air irigasi dan larutan sedimen dilakukan dengan menggunakan dua buah botol plastik ukuran 600 ml. Satu contoh untuk keperluan penetapan kadar lumpur dan satu botol contoh lainnya untuk penetapan N, P, dan 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. Pengambilan contoh dan pengukuran debit 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. Untuk alasan keamanan, pengamatan diakhiri juga pada pukul

17:30. Prosedur selengkapnya dapat dilihat pada Sukristiyonubowo (2007 dan 2008a).

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

Pada fase generatif, pengambilan contoh air irigasi, pengukuran debit air irigasi dan larutan sedimen dikerjakan ketika petani membuka dan menutup saluran air masuk utama dan saluran air keluar mengairi sawahnya (a) untuk mengganti air yang telah ada di sawah, dan (b) untuk mempertahankan ketinggian air pada petakan sawah. Pengamatan juga dilakukan tiga kali sehari, yaitu pada jam 08:00, 12:00, dan 16:00.

Data yang dikumpulkan mencakup debit, kadar lumpur, konsentrasi N, P, dan K terlarut pada air irigasi dan larutan sedimen. Data lain yang diperlukan adalah lamanya saluran air dibuka pada setiap aktivitas yang dilakukan oleh petani di setiap fase pertumbuhan tanaman padi.

Metode pelampung (*Floating Method with stopwatch*) digunakan untuk mengukur debit air irigasi pada saluran masuk utama. Untuk debit larutan sedimen diukur pada saluran air keluar utama dengan metode tampungan (*Bucket Method*). Ember dengan kapasitas isi 11 liter digunakan untuk penetapan debit larutan sedimen dengan metode tampungan (Sukristiyonubowo. 2007 dan 2008a) dan (WMO, 1994).

Analisis statistik ditekankan pada penghitungan nilai rerata (*mean*) dan standar deviasi debit, konsentrasi sedimen, sedimen sewaktu (yang adalah rata-rata dari ke empat perlakuan yang dicoba) dan musiman (yang adalah rata-rata dari setiap pengamatan) dilanjutkan uji DMRT (*Duncan Multiple Range Test*) dengan menggunakan program SPSS versi 11.5 for windows.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Debit dan konsentrasi sedimen sewaktu dan musiman air irigasi dan larutan sedimen selama pertumbuhan padi pada musim hujan dan kemarau

Hasil pengukuran debit dan konsentrasi sedimen air irigasi dan larutan sedimen pada saluran air masuk utama dan saluran air keluar utama selama pertumbuhan tanaman padi musim hujan 2003-04 dan musim kemarau 2004 disajikan pada Tabel 2 dan 3.

Secara umum debit sewaktu (*temporal discharge*) dan debit musiman (*seasonal discharge*) air irigasi dan larutan sedimen pada MH 2003-04 lebih tinggi dibandingkan dengan debit air irigasi dan larutan sedimen pada MK 2004 (Tabel 2). Selisih debit air irigasi antara musim hujan dan musim kemarau berkisar $0,54 \text{ l detik}^{-1}$ dan untuk larutan sedimen adalah sekitar $0,35 \text{ l detik}^{-1}$. Sementara, beda debit sewaktu bervariasi dari 0,12 sampai $1,51 \text{ l detik}^{-1}$, tergantung pada fase tumbuh tanaman padi. Besarnya debit musiman air irigasi adalah $1,33 \pm 0,36$ dan larutan sedimen $0,85 \pm 0,20 \text{ l detik}^{-1}$ untuk MH 2003-04, sedangkan debit pada MK 2004

sebesar $0,79 \pm 0,15$ untuk air irigasi dan $0,50 \pm 0,10 \text{ l detik}^{-1}$ untuk larutan sedimen. Sukristiyonubowo (2008a; 2008, dan 2007) menjelaskan bahwa variasi debit air irigasi baik sewaktu maupun musiman (*temporal and seasonal variations*) disebabkan oleh pengaruh langsung dari curah hujan dan intensitas tindak agronomis (pengolahan tanah, penyiangan dan pemupukan) yang dikerjakan oleh petani. Selama pengamatan yang dimulai dari proses pelumpuran sampai dengan fase generatif banyak terjadi hujan. Keadaan ini berpengaruh langsung terhadap meningkatnya debit air irigasi, yang ditandai dengan perubahan tinggi permukaan air, laju kecepatan air dan warna air sungai yang lebih coklat. Sebaliknya, lebih rendahnya debit dan variasinya di musim kemarau karena penggunaan air yang relatif bersamaan sementara sumber airnya terbatas.

Peningkatan debit larutan sedimen baik sewaktu maupun musiman disamping pengaruh langsung dari air hujan juga adanya pengaruh dari meningkatnya debit air irigasi yang masuk ke lahan sawah. Besarnya debit larutan sedimen adalah $0,85 \pm 0,20 \text{ l detik}^{-1}$ untuk MH 2003-04 dan $0,50 \pm 0,10 \text{ l detik}^{-1}$.

Tabel 2. Debit sewaktu dan musiman air irigasi (yang diukur pada saluran masuk utama) dan larutan sedimen (yang diukur pada saluran keluar utama) selama pertumbuhan padi, pada MH 2003-04 dan MK 2004

Table 2. Temporal and seasonal variation of discharge and sediment concentration of irrigation water (measured at the main inlet) and suspended sediment (measured at the main outlet) during rice growth in the wet season 2003-04 and dry season 2004

Waktu pengamatan	Debit air irigasi		Debit larutan sedimen	
	MH 2003-04	MK 2004	MH 2003-04	MK 2004
	 l detik^{-1}			
Pelumpuran	$2,73 \pm 0,90 \text{ a}^*$	$1,22 \pm 0,23 \text{ a}$	$1,14 \pm 0,29 \text{ a}$	$0,64 \pm 0,12 \text{ a}$
Setelah pelumpuran sampai dengan tanam	$1,46 \pm 0,26 \text{ b}$	$1,06 \pm 0,13 \text{ b}$	$1,17 \pm 0,18 \text{ a}$	$0,71 \pm 0,09 \text{ a}$
Fase vegetatif :				
• Sebelum pemupukan I	$0,51 \pm 0,26 \text{ c}$	$0,33 \pm 0,16 \text{ c}$	$0,40 \pm 0,22 \text{ b}$	$0,22 \pm 0,11 \text{ b}$
• Setelah pemupukan I	$0,44 \pm 0,23 \text{ c}$	$0,32 \pm 0,15 \text{ c}$	$0,34 \pm 0,21 \text{ b}$	$0,22 \pm 0,10 \text{ b}$
Fase generatif :	$1,50 \pm 0,13 \text{ b}$	$1,01 \pm 0,09 \text{ b}$	$1,21 \pm 0,12 \text{ a}$	$0,73 \pm 0,08 \text{ a}$
• Debit musiman	$1,33 \pm 0,36$	$0,79 \pm 0,15$	$0,85 \pm 0,20$	$0,50 \pm 0,10$

Keterangan : * Angka dalam kolom yang sama yang diikuti dengan huruf yang sama tidak berbeda nyata pada taraf 5% uji DMRT

Debit sewaktu air irigasi pada saat pelumpuran, baik pada MH 2003-04 dan MK 2004, adalah yang terbesar dan berbeda nyata jika dibandingkan dengan fase pertumbuhan tanaman padi berikutnya. Hal ini disebabkan pada saat pelumpuran air banyak dibutuhkan untuk (a) pembasahan dan penjemuran lahan (*land soaking*), (b) proses pelumpuran untuk menciptakan struktur lumpur (*to create puddled structure*), dan (c) perataan permukaan lahan untuk memudahkan penanaman (*to facilitate transplanting*). Tingginya debit air irigasi saat pelumpuran ini mengindikasikan dan membuktikan bahwa pemberian air pada saat pengolahan tanah adalah yang paling banyak dalam siklus hidup tanaman padi. Kesimpulan yang sama dilaporkan oleh De Datta *et al.* (1981), Bhuiyan *et al.* (1994), dan Bouman *et al.* (2005), yang menyatakan bahwa separuh lebih kebutuhan air untuk penanaman padi dialokasikan saat pengolahan tanah dan banyaknya air yang diberikan saat pengolahan tanah berkisar antara 240 sampai 900 mm bergantung pada lama pengolahan tanah. Dalam penelitian ini, besarnya debit air irigasi saat pelumpuran adalah $2,73 \pm 0,90$ untuk musim hujan dan $1,22 \pm 0,23$ l detik⁻¹ untuk musim kemarau. Selanjutnya, tingginya debit air irigasi ini berpengaruh langsung terhadap besar debit larutan sedimen. Pada tahap pelumpuran debit larutan sedimen adalah yang paling tinggi, baik musim penghujan maupun musim kemarau, yaitu $1,14 \pm 0,29$ l detik⁻¹ untuk MH 2003-04 dan $0,64 \pm 0,12$ l detik⁻¹ untuk MK 2004.

Pada fase vegetatif, baik pada musim hujan maupun musim kemarau, memperlihatkan debit air irigasi yang paling rendah dan berbeda nyata jika dibandingkan fase pertumbuhan tanaman padi lainnya. Diduga hal ini berkaitan dengan (1) kondisi tanaman yang masih muda dan mengalami masa transisi pindahan (istilah lokal *nglilir*) sehingga belum kuat menerima goncangan, (2) fase dimana pupuk pertama dan kedua diberikan, jadi debit rendah untuk mencegah hilangnya pupuk melalui pergerakan air (*runoff water*), (3) kebutuhan tanaman padi muda akan air belum besar, sehingga

dapat mengurangi hilangnya air melalui evaporasi, dan (4) ketinggian air (*pounding water layer*) yang dicapai antara 1-3 cm dan sudah cukup untuk menekan laju pertumbuhan gulma. Besarnya debit pada fase vegetatif adalah $0,48 \pm 0,23$ l detik⁻¹ untuk musim hujan dan $0,33 \pm 0,16$ l detik⁻¹ untuk musim kemarau. Rendahnya debit saat fase vegetatif, secara langsung juga menghasilkan debit larutan sedimen yang paling rendah yang berbeda secara nyata dibandingkan fase pertumbuhan lainnya. Besarnya debit larutan sedimen saat fase vegetatif yaitu $0,36 \pm 0,21$ l detik⁻¹ untuk MH 2003-04 dan $0,22 \pm 0,11$ l detik⁻¹ untuk MK 2004.

Lebih tingginya debit pada fase generatif jika dibandingkan dengan fase vegetatif, kemungkinan besar berkaitan dengan kebutuhan tanaman akan air yang lebih besar dengan semakin bertumbuh dan berkembangnya rumpun tanaman padi dan untuk mengimbangi evapotranspirasi yang semakin tinggi. Besarnya debit air irigasi pada fase generatif adalah $1,50 \pm 0,13$ l detik⁻¹ untuk musim hujan 2003-04 dan $1,01 \pm 0,09$ l detik⁻¹ untuk musim kemarau 2004. Berkembangnya rumpun anakan padi ini diduga juga menghambat laju air, sehingga debit larutan sedimen menjadi lebih kecil dibandingkan debit air irigasi yang masuk ke lahan sawah. Debit sewaktu larutan sedimen pada fase generatif adalah $1,21 \pm 0,12$ l detik⁻¹ untuk musim hujan 2003-04 dan $0,73 \pm 0,08$ l detik⁻¹ untuk musim kemarau 2004.

Fenomena yang sama juga diamati pada kadar lumpur atau konsentrasi sedimen, dimana ada perbedaan yang besar pada setiap waktu pengamatan dan antar musim. Konsentrasi sedimen sewaktu bervariasi antara $0,205 \pm 0,017$ dan $0,388 \pm 0,084$ g l⁻¹ pada MH 2003-04 dan mulai $0,133 \pm 0,014$ sampai dengan $0,215 \pm 0,055$ g l⁻¹ pada MK 2004, bergantung pada waktu pengamatan. Sementara, konsentrasi sedimen musiman air irigasi berkisar $0,262 \pm 0,033$ g l⁻¹ untuk MH 2003-04 dan $0,147 \pm 0,026$ g l⁻¹ untuk MK 2004. Sedangkan, konsentrasi sedimen musiman untuk larutan sedimen adalah $0,839 \pm 0,257$ g l⁻¹ untuk MH 2003-04 dan $0,712 \pm 0,134$ g l⁻¹ untuk MK 2004 (Tabel 3).

Tabel 3. Konsentrasi sedimen air irigasi (contoh diambil pada saluran masuk utama) dan larutan sedimen (contoh diambil pada saluran keluar utama) selama pertumbuhan padi, pada MH 2003-04 dan MK 2004

Table 3. Sediment concentration of irrigation water (taken at the main inlet) and suspended sediment (taken at the main outlet) during rice growth in the wet season 2003-04 and dry season 2004

Waktu pengamatan	Konsentrasi sedimen sewaktu			
	Air irigasi		Larutan sedimen	
	MH 2003-04	MK 2004	MH 2003-04	MK 2004
	 g l ⁻¹			
Pelumpuran	0,388 ± 0,084 a*	0,215 ± 0,055 a	3,275 ± 1,205 a	3,113 ± 0,618 a
Setelah pelumpuran sampai dengan tanam	0,303 ± 0,029 b	0,138 ± 0,015 b	0,277 ± 0,018 b	0,121 ± 0,015 b
Fase vegetatif :				
• Sebelum pemupukan I	0,273 ± 0,031 b	0,124 ± 0,031 b	0,245 ± 0,028 b	0,112 ± 0,014 b
• Setelah pemupukan I	0,244 ± 0,015 b	0,122 ± 0,015 b	0,222 ± 0,018 b	0,110 ± 0,012 b
Fase generatif :				
• Konsentrasi sedimen musiman	0,205 ± 0,017 b	0,113 ± 0,014 b	0,175 ± 0,017 b	0,104 ± 0,010 b
	0,262 ± 0,033	0,147 ± 0,026	0,839 ± 0,257	0,712 ± 0,134

Keterangan : * Angka dalam kolom yang sama yang diikuti dengan huruf yang sama tidak berbeda nyata pada taraf 5% uji DMRT

Seperti peristiwa yang terjadi pada pengukuran debit air irigasi saat pelumpuran, baik MH 2003-04 maupun MK 2004, kejadian yang sama juga diamati untuk konsentrasi sedimen air irigasi. Pada saat pelumpuran, konsentrasi sedimen air irigasi adalah yang paling tinggi dan berbeda nyata dibandingkan konsentrasi sedimen air irigasi pada fase pertumbuhan tanaman padi berikutnya. Besarnya konsentrasi sedimen air irigasi saat pelumpuran yaitu $0,388 \pm 0,084$ dan $0,214 \pm 0,055$ g l⁻¹, masing-masing untuk MH 2003-04 dan MK 2004 (Tabel 3). Tingginya konsentrasi sedimen air irigasi ini berkaitan dengan terbuangnya butir-butir tanah dari kawasan atas (*upstream*) ke sungai atau saluran air saat pengolahan tanah di kawasan atas berlangsung melalui larutan sedimen. Alasan lainnya, meningkatnya debit kanal/saluran air yang diikuti dengan peningkatan laju pergerakan air juga berkontribusi terhadap tingginya konsentrasi sedimen air irigasi melalui erosi tebing dan dasar kanal (*stream bang erosion*). Fenomena yang sama dilaporkan oleh Sukristiyonubowo *et al.* (2004).

Menarik pula untuk dicatat bahwa konsentrasi sedimen atau kadar lumpur dari larutan sedimen (*suspended sediment*) pada saat pelumpuran, baik

musim hujan maupun musim kemarau, adalah yang paling tinggi, sekitar 15-20 kali lebih besar jika dibandingkan dengan konsentrasi sedimen air irigasi dan larutan sedimen pada fase pertumbuhan tanaman padi selanjutnya (Tabel 3). Tingginya kadar lumpur larutan sedimen ini disebabkan adanya pemecahan agregat tanah selama proses pelumpuran untuk menciptakan struktur lumpur (*puddle structure*), sehingga banyak butir-butir tanah yang berdiameter halus sampai sedang terangkut melalui pergerakan larutan sedimen yang berwarna semakin coklat seiring dengan lamanya proses pelumpuran. Sukristiyonubowo (2007) mengamati bahwa jumlah dan luasan teras, terutama teras terakhir, dimana larutan sedimen jatuh menuju ke sungai atau kanal melalui saluran air keluar utama (*main outlet*), sangat berpengaruh terhadap proses redeposisi larutan sedimen, yang pada akhirnya akan berpengaruh terhadap kadar lumpur dari larutan sedimen tersebut. Dugaan lain yang juga perlu dikemukakan disini adalah adanya benturan air hujan dengan bidang olah (*splash erosion*) dan pematang (*dykes erosion*) mengingat pada saat pelumpuran permukaan bidang olah terbuka (*bare land*) dan pematang sawah baru dibersihkan dari gulma.

Pengaruh *spas erosion* dan *dyke erosion* ini juga terjadi pada fase vegetatif, karena tanaman relatif masih muda dan baru dipindahkan, disamping tinggi genangan hanya mencapai 1-3 cm. Ini semua dapat dikenali melalui adanya spot-spot air berwarna coklat di areal pertanaman padi.

Dengan semakin meningkatnya pertumbuhan padi, konsentrasi sedimen sewaktu baik air irigasi maupun larutan sedimen terlihat semakin menurun. Konsentrasi sedimen sewaktu tertinggi dicapai saat pelumpuran dan terendah pada fase generatif. Diduga hal ini berkaitan dengan semakin berkurangnya tindak agronomis yang dikerjakan (seperti pemupukan dan penyiangan) dengan semakin berkembangnya tanaman padi dan semakin meningkatnya air genangan (*ponding water layer*). Akibatnya gangguan secara langsung pada struktur tanah semakin berkurang pula, sehingga butiran-butiran tanah lebih banyak yang mengendap (*settling down*) dan yang terbawa air irigasi maupun yang terangkut melalui larutan sedimen berkurang pula.

Sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi dan yang terangkut keluar melalui larutan sedimen selama pertumbuhan padi pada musim hujan dan kemarau

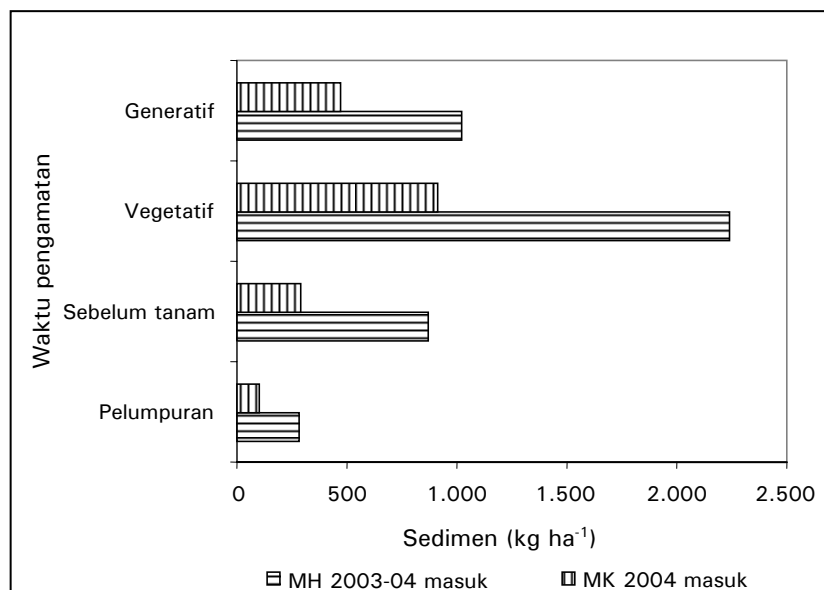
Sedimen sewaktu yang terbawa masuk melalui air irigasi dan yang terangkut keluar oleh larutan sedimen selama pertumbuhan tanaman padi pada MH 2003-04 dan MK 2004 disajikan pada Gambar 1 dan 2.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa banyaknya sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi baik musim hujan maupun musim kemarau pada fase vegetatif adalah yang tertinggi dan berbeda secara nyata dibandingkan dengan saat pengamatan lainnya (Gambar 1), walaupun pada fase ini memiliki debit yang paling rendah dan konsentrasi sedimen yang rendah (Tabel 2 dan 3). Alasan paling kuat mengarah pada lamanya saluran air masuk utama dibuka. Data pengamatan menunjukkan bahwa dibandingkan dengan saat pelumpuran, tanam dan fase generatif, pada fase vegetatif petani membuka saluran air masuk utama

(dan tentu saluran air keluar utama) adalah yang paling lama, yaitu selama 18 dan 21 hari, masing masing untuk musim hujan 2003-04 dan musim kemarau 2004. Sedangkan, saat pelumpuran, sebelum tanam dan fase generatif saluran air masuk utama dibuka masing masing selama 1 hari, 6 hari, dan 10-12 hari. Dengan demikian, ada beda yang besar pada lamanya air diberikan, yaitu antara 8 sampai 17 hari untuk MK 2003-04 dan antara 9 sampai 20 hari untuk MK 2004.

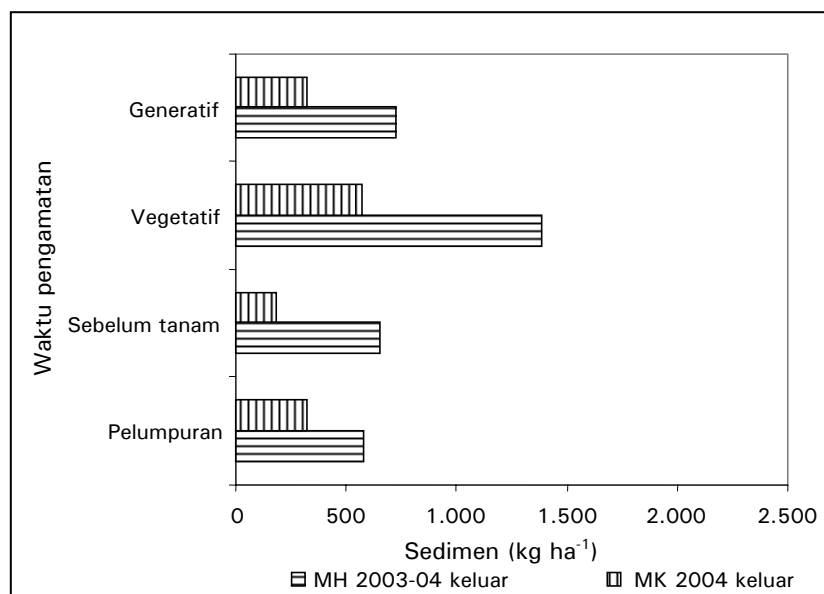
Perbedaan jumlah hari ini akan menghasilkan selisih total air yang masuk (*water input*) yang besar, sehingga akan menghasilkan variasi sedimen sewaktu yang terbawa masuk dan yang terangkut keluar tinggi. Sukristiyonubowo (2007, 2008a, dan 2008b) menjelaskan bahwa sedimen adalah perkalian antara total volume air irigasi x konsentrasi sedimen. Besarnya sedimen sewaktu yang terbawa masuk oleh air irigasi pada MH 2003-04 berturut-turut adalah 285 ± 35 ; 872 ± 73 ; 2.242 ± 184 dan 1.023 ± 69 kg ha⁻¹ masing-masing pada saat pelumpuran, sebelum tanam, fase vegetatif, dan fase generatif. Sementara, pada MK 2004 berturut-turut adalah 104 ± 9 ; 290 ± 22 ; 915 ± 53 dan 470 ± 42 kg ha⁻¹ masing-masing pada saat pelumpuran, sebelum tanam, fase vegetatif dan fase generatif.

Fenomena yang sama diamati untuk sedimen sewaktu yang terangkut keluar melalui larutan sedimen, baik musim hujan 2003-04 maupun musim kemarau 2004. Pada fase vegetatif sedimen yang terangkut keluar oleh larutan sedimen adalah yang paling besar dan berbeda secara nyata dibandingkan fase generatif, sebelum tanam dan saat pelumpuran (Gambar 2). Alasan yang sama untuk menerangkan sedimen yang terbawa air irigasi, baik pada musim hujan dan musim kemarau juga berlaku untuk menerangkan kejadian ini. Artinya bahwa lamanya saluran air masuk utama dan saluran air keluar utama dibuka lebih dominan berpengaruh jika dibandingkan besarnya debit dan konsentrasi sedimen. Lama (jumlah hari) saluran air masuk dan air keluar berpengaruh langsung terhadap jumlah air yang masuk dan larutan sedimen yang keluar (Volume = debit x waktu, rumus selengkapnya dapat dilihat pada Sukristiyonubowo (2007, 2008a, dan 2008b).



Gambar 1. Variasi sewaktu sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi selama pertumbuhan padi MH 2003-04 dan MK 2004

Figure 1. Temporal variation of incoming sediment during rice growth in the wet season 2003-04 and dry season 2004



Gambar 2. Variasi sewaktu sedimen yang terangkut keluar melalui larutan sedimen selama pertumbuhan padi MH 2003-04 dan MK 2004

Figure 2. Temporal variation of out going sediment during rice growth in the wet season 2003-04 and dry season 2004

Besarnya sedimen sewaktu yang terangkut keluar oleh larutan sedimen pada MH 2003-04 berturut-turut adalah 580 ± 21 ; 653 ± 60 ; 1.384 ± 118 ; dan 728 ± 60 kg ha⁻¹ masing-masing pada saat pelumpuran, sebelum tanam, fase vegetatif dan fase generatif. Sementara, pada MK 2004 berturut-turut adalah 324 ± 16 ; 180 ± 17 ; 570 ± 45 ; dan 325 ± 35 kg ha⁻¹ masing-masing pada saat pelumpuran, sebelum tanam, fase vegetatif, dan fase generatif.

Gambar 1 dan 2 mendemonstrasikan bahwa hanya pada saat pelumpuran, baik musim hujan maupun musim kemarau, sedimen yang terangkut keluar lebih besar dibandingkan fase pertumbuhan tanaman padi berikutnya. Data ini berarti bahwa 1) hanya pada saat pelumpuran erosi terjadi pada sawah berteras karena pengolahan tanah (*tillage erosion*), 2) setelah pelumpuran sampai dengan fase generatif terjadi redeposisi sedimen karena sedimen yang terbawa masuk lebih besar dari pada yang terangkut keluar, dan (3) sedimen yang teredeposisi (*redeposited sediment*) lebih besar dari pada yang tererosi (*displaced sediment*). Perbedaan ini menghasilkan sejumlah sedimen dan hara yang dikandung sedimen tersimpan di teras-teras sawah selama musim hujan dan musim kemarau. Dengan demikian dapat juga diartikan bahwa selisih nilai positif tersebut mengindikasikan adanya fungsi lingkungan (*environmental services*) yang diberikan oleh sawah berteras selain tempat menghasilkan beras. Fungsi yang diberikan yang berkaitan dengan data yang ada adalah meningkatkan kualitas air dan menurunkan dampak negatif pada kawasan bawah (*reducing negative downstream effect*).

Terjadinya variasi sewaktu sedimen (baik yang terbawa masuk oleh air irigasi maupun yang terangkut keluar melalui larutan sedimen) yang besar menghasilkan variasi musiman yang besar. Selisihnya berkisar 2.643 kg ha⁻¹ musim⁻¹ untuk sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi dan berkisar 1.955 kg ha⁻¹ musim⁻¹ untuk sedimen yang terangkut keluar oleh larutan sedimen (Tabel 4). Seperti yang telah dibahas sebelumnya, perbedaan ini disebabkan oleh pengaruh curah hujan yang menghasilkan perbedaan debit dan konsentrasi sedimen, dimana debit dan konsentrasi sedimen musim hujan lebih besar daripada musim kemarau.

Menarik untuk dicatat bahwa sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi, baik musim hujan maupun musim kemarau, lebih banyak dibandingkan sedimen yang terangkut keluar oleh larutan sedimen. Ini berarti ada sejumlah sedimen yang diendapkan kembali di teras-teras sawah. Banyaknya sedimen yang diredeposisi adalah 1.077 ± 140 kg ha⁻¹ untuk MH 2003-04 dan 379 ± 43 kg ha⁻¹ untuk MK 2004. Data ini membuktikan adanya fungsi lingkungan dari sawah berteras seperti yang disebutkan pada pembahasan sebelumnya.

KESIMPULAN

1. Debit sewaktu tertinggi air irigasi dan larutan sedimen, baik pada musim hujan maupun musim kemarau, dicapai pada fase pelumpuran. Sebaliknya, debit sewaktu terendah air irigasi dan larutan sedimen ditemukan pada fase vegetatif. Selanjutnya, debit musiman air irigasi lebih tinggi dibandingkan debit musiman larutan sedimen, baik pada musim hujan maupun musim kemarau.

Tabel 4. Variasi musiman sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi dan yang terangkut keluar oleh larutan pada sistem sawah berteras selama pertumbuhan padi, MH 2003-04 dan MK 2004

Table 4. Seasonal variation of incoming and outgoing sediment during rice growth in the wet season 2003-04 and dry season 2004

Musim	Sedimen yang masuk	Sedimen yang keluar	Neraca sedimen
	 kg ha ⁻¹		
MH 2003-04	4.422 ± 361	3.345 ± 258	1.077 ± 140
MK 2004	1.779 ± 126	1.400 ± 113	379 ± 43

2. Konsentrasi sedimen sewaktu tertinggi air irigasi dan larutan sedimen, baik musim hujan maupun musim kemarau, terjadi pada fase pelumpuran. Sementara itu, konsentrasi sedimen musiman air irigasi dan larutan sedimen pada musim hujan lebih tinggi dibandingkan musim kemarau.
3. Pada fase vegetatif, sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi baik musim hujan maupun musim kemarau adalah yang paling tinggi dan berbeda secara nyata dibandingkan fase generatif, sebelum tanam dan saat pelumpuran. Hal yang sama diamati untuk sedimen yang terangkut keluar oleh larutan sedimen.
4. Pada fase pelumpuran, sedimen yang terbawa keluar lebih tinggi dibandingkan dengan sedimen yang terbawa masuk, sementara pada fase lainnya (sebelum penanaman, vegetatif, dan generatif) sedimen yang terbawa masuk air irigasi lebih tinggi dari yang terangkut keluar melalui larutan sedimen. Selanjutnya, sedimen yang terbawa masuk oleh air irigasi selama musim hujan dan kemarau selalu lebih tinggi dibandingkan dengan yang terangkut keluar melalui larutan sedimen. Semua ini mendemonstrasikan fungsi ekologis dari sistem sawah berteras.

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.
- 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* A.R. Maglinao, C. Valentin, and F.W.T. Penning de Vries (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.
- 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* S.P. Wani, A.R Maglinao, A. Ramakrisna, and T.J. Rego (Eds.). Integrated Catchment Management for Land and Water Conservation and Sustainable Agricultural Production in Asia.
- Aksoy, H. and H.L. Kavvas. 2005.** A Review of Hillslope and Watershed Scale Erosion and Sediment Transport Model. *Catena*. 64:247-271.
- 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. Hlm 280.
- 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 constrains, opportunities, and innovations for wet seeded rice, Bangkok, May 31-June 3, 1994. P 19.
- 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., 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.

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.

De Datta, S.K. 1981. Principles and Practices of Rice Production. IRRI, Los Banos, Philippines. P 618.

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* S.P. Wani, A.R. Maglino, A. Ramakrisna, and T.J. Rego (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.

Gajri, P.R., K.S. Gill, R. Singh, and B.S. Gill. 1999. Effect of pre-planting tillage on crop yields and weeds biomass in a rice-wheat system on a sandy loam soil in Punjab. *Soil and Tillage Research* 52:83-89.

Ghildyal, B.P. 1971. Soil and water management for increased water and fertiliser use efficiency for rice production. Pp 499-509. *In* J.S. Kanwar, N.P. Datta, S.S. Bains, D.R. Bhumbra, and T.D. Biswas (Eds.) Proceedings of International Symposium on Soil Fertility Evaluation.

Hashim, 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* F.W.T. Penning de Vries, F. Agus, and J. Kerr (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.

Kukul, S.S. and G.C. Aggarwal. 2003. Puddling depth and intensity effects in rice-wheat system on a sandy loam soil. I. Development of subsurface compaction. *Soil and Tillage Research* 72:1-8.

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* J.S. Kanwar, N.P. Datta, S.S. Bains, D.R. Bhumbra, and T.D. Biswas (Eds.). Proceedings of International Symposium on Soil Fertility Evaluation.

Ng Kee Kwong, K.F., A. Bholah, L. Volcy, and K. Pynee. 2002. Nitrogen and phosphorus transport by surface runoff from a silty clay loam soil under sugarcane in the humid tropical environment of Mauritius. *Agriculture, Ecosystem, and Environment* 91:147-157.

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* S.P. Wani, A.R. Maglino, A. Ramakrisna, and T.J. Rego (Eds.). Integrated Catchment Management for Land and Water Conservation and Sustainable Agricultural Production in Asia. CD-Rom (one CD).

- Ray, S.S. and R.P. Gupta. 2001.** Effect of green manuring and tillage practices on physical properties of puddled loam soil under rice-wheat cropping system. *Journal of Indian Society Soil Science* 49(4):670-678.
- 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.
- Sanchez, P.A. and M. de Calderon. 1971.** Timing of nitrogen application for rice grown under intermittent flooding in the coast of Peru. Pp 595-602. *In* J.S. Kanwar, N.P. Datta, S.S. Bains, D.R. Bhumbra, and T.D. Biswas (Eds.). *Proceedings of international symposium on soil fertility evaluation.*
- Sharma, P.K. and S.K. De Datta. 1986.** Physical properties and processes of puddled rice soils. *Advance Soil Science* 5:139-178.
- Sharma, P., R.P. Tripathi, and S. Singh. 2005.** Tillage effects on soil physical properties and performance of rice-wheat-cropping under shallow water table conditions of Tarai, Northern India. *European Journal of Agronomy* 23:327-335.
- Sukristiyonubowo. 2008a.** Mobilitas sedimen dan hara pada sistem sawah berteras dengan irigasi tradisional. *Jurnal Tanah dan Iklim* 28: 39-54.
- Sojka, R.E., D.L. Carter, and M.J. Brown. 1992.** Imhoff cone determination of sediment in irrigation runoff. *Soil Science Society of America Journal* 56(3):884-890.
- Sukristiyonubowo. 2008b.** Sedimen dan unsur hara yang terangkut saat pengolahan tanah pada sawah berteras. Hlm 225-245. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Sumberdaya Lahan dan Lingkungan. Badan Litbang Pertanian. Buku II.
- Sukristiyonubowo. 2007.** Nutrient Balances in Terraced Paddy Fields under Traditional Irrigation in Indonesia. PhD thesis. Faculty of Bioscience Engineering, Ghent University, Ghent, Belgium. P 184.
- 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, 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* A.R. Maglinao, C. Valentin, and F.W.T. Penning de Vries (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.*
- Sys, C. 1989.** Land evaluation and land use planning, with special reference to steep lands. Pp 77-95. *In* Soil management and smallholder development in the Pacific Islands. IBSRAM-Thailand Proceedings.
- 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* S.P. Wani, A.R. Maglinao, A. Ramakrishna, and T.J. Rego (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, H.R. von. 1989. Nutrient cycling. Pp 121-132. *In* Soil Management and Smallholder Development in the Pacific Island. IBSRAM-Thailand Proceedings.

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. P 735.