

Teknik Pb-210 *excess* untuk Estimasi Laju Erosi Lahan Berlereng di Kabupaten Nganjuk Yang Lebih Akurat

Using Pb-210 excess for More Accurate Estimation of Erosion Rate on the Slope Land in Nganjuk District

Barokah Aliyanta

Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN
Jl. Lebak Bulus Raya No. 49 Jakarta Selatan 12440
Email : barali@batan.go.id

Diterima 26-08-2014; Diterima dengan revisi 15-09-2014; Disetujui 04-11-2014

ABSTRAK

Teknik Pb-210 *excess* untuk Estimasi Laju Erosi Lahan Berlereng di Kabupaten Nganjuk Yang Lebih Akurat. Penelitian laju erosi dengan menggunakan teknik perunut Pb-210 *excess* telah dilakukan di daerah Nganjuk. Penelitian mencakup daerah Kecamatan Sawahan, Ngetos dan Loceret, dengan luas area berkisar 11.000 ha. Pengambilan contoh tanah dilakukan dengan pendekatan pengelompokan berdasarkan lokasi, peta jenis tanah, peta tataguna lahan, peta topografi dan peta *drainage*. Dari tiap kelompok tanah, contoh tanah diambil mengikuti transek lerengan (*hillslope transect*) dengan kedalaman 30 cm. Adapun contoh pembandingan diambil pada lokasi lerengan bukit (*hillslope*) dengan ciri tertutup secara baik dengan tanaman rumput dan tanaman utama pinus. Hasil inventori pembandingan Pb-210 *excess* rerata adalah 2465 Bq/m², dan nilai ini digunakan untuk menghitung laju erosi rata-rata tahunan dari rentang waktu tahun 1963 sampai 2006. Estimasi laju erosi yang didapat bervariasi dari suatu lokasi ke lokasi lainnya adalah antara 5 sampai mendekati 100 ton/ha/th, dan nilai rasio penghantaran sedimen (SDR) adalah dari 12 % sampai 100%. Proses erosi terjadi di semua jenis tanah. Hal ini disebabkan belum diterapkannya secara bersama-sama tindakan konservasi lahan secara fisik dan vegetatif.

Kata kunci : Pb-210 *excess*, inventori, transek, laju erosi, rasio penghantaran sedimen

ABSTRACT

Using Pb-210 *excess* for More Accurate Estimation of Erosion Rate on the Slope Land in Nganjuk District. Erosion rate investigation was conducted using a natural radionuclide Pb-210 *excess* on the slope land in Nganjuk district, East Java. The investigated area covers Sawahan; Ngetos and Loceret sub-district with an area approximately of 11,000 ha. Soil samples were collected and grouped based on soil types, locations, land use, topography and drainage maps. Soil samples were taken from each group in hillslope transects. Meanwhile, the reference samples were taken from the hill slope that was well covered by grass and pine trees. Pb-210 *excess* average reference inventory was 2465 Bq/m², and this value was used to calculate annual erosion rate from the 1963 to 2006. Estimated erosion rate ranging from 5 up to 100 ton/ha/yr, and the sediment delivery ratio (SDR) varied from 12 % to 100 %. The process of erosion occurs in all types of soil. This was because of the physically and vegetatively land conservation measures have not been implemented together.

Keywords : Pb-210 *excess*, inventory, transect, erosion rate, sediment delivery ratio

PENDAHULUAN

Laju erosi tanah merupakan permasalahan yang cukup serius di

kebanyakan negara berkembang, seperti halnya Indonesia. Di Indonesia, laju erosi tanah yang paling umum disebabkan karena aliran air. Secara umum, erosi tanah karena

aliran air ini terdiri dari 3 tahapan proses yaitu penghancuran permukaan tanah oleh tetesan air hujan, pengangkutan butiran tanah oleh aliran permukaan dan pengendapan partikel tererosi pada cekungan maupun dalam sistem aliran air yang lebih besar. Erosi tanah dipicu beberapa faktor seperti curah hujan yang tinggi baik kuantitas maupun intensitasnya, lereng-lereng yang curam, tanah yang peka erosi dan praktek pertanian yang tidak disertai upaya pengendalian erosi [1]. Laju erosi yang melebihi ambang batas akan menyebabkan terjadinya pengurangan kesuburan tanah, dan pendangkalan aliran sungai dan bendungan pada daerah hilir.

Di lahan pertanian, erosi banyak terjadi pada lahan berlereng yang dikelola untuk budidaya tanaman semusim yang tidak disertai dengan tindakan-tindakan konservasi tanah seperti pengolahan tanah secara intensif baik saat sebelum tanam maupun setelah panen. Adanya dampak yang begitu luas dari erosi tanah, maka kebutuhan akan data dan informasi terkait dengan tingkat/laju erosi tanah suatu tempat sangat diperlukan dalam rangka perencanaan untuk konservasi tanah dan air, sekaligus untuk menjaga kelestarian pertanian itu sendiri.

Perkiraan tingkat laju erosi dapat diperoleh dengan berbagai cara, seperti berdasarkan USLE (*Universal Soil Loss Equation*), *Revised USLE*, dan *GUEST (Griffith University Erosion System Template)*. Namun demikian, tingkat erosi di Indonesia, yang paling banyak digunakan berdasarkan USLE [2,3,4]. Di dalam USLE, faktor-faktor yang dijadikan parameter untuk mengestimasi laju erosi adalah indeks erosivitas hujan (R), faktor erodibilitas tanah (K), faktor panjang dan kemiringan lereng (LS), faktor penutupan vegetasi dan pengelolaan tanaman (C) dan faktor pengelolaan lahan atau tindakan konservasi tanah (P). Hasil prediksi erosi menggunakan USLE umumnya didasarkan pada data GIS dan pengolahan citra satelit terkait dengan parameter curah hujan, jenis tanah, kemiringan lahan dan peta tutupan lahan

dan disesuaikan dengan faktor-faktor yang dijadikan parameter tersebut di atas. Hasil perkiraan tingkat erosi menggunakan USLE hanya memberikan nilai net erosi masing-masing spasial dalam tahun dimana citra satelit diambil, meskipun kondisi sesungguhnya di lapangan masih terjadi deposisi sedimen dari hasil transpor partikel tanah tererosi pada bidang olah budidaya pertanian dan sepanjang lereng yang ada. Kondisi lain yang sering dihadapi adalah terjadinya perubahan tata guna lahan yang berimplikasi pada perbedaan prediksi erosi setiap tahunnya. Pada budidaya pertanian di suatu daerah yang telah berlangsung bertahun-tahun dan telah mengalami perubahan tata guna lahan, prediksi erosi total selama kurun waktu tersebut memerlukan data citra satelit yang lebih banyak dan memerlukan waktu yang lebih lama.

Seiring dengan berkembangnya teknologi pengukuran radioperunut alam dan pemodelan matematika, pemanfaatan radionuklida jatuhan seperti Cs-137 dan Pb-210 *excess* untuk memperkirakan laju erosi juga berkembang dengan pesat. Kedua radionuklida jatuhan tersebut sebelumnya banyak dimanfaatkan dalam penelitian laju sedimentasi dan geokronologi polutan. Teknologi nuklir dengan radionuklida jatuhan Cs-137 dan Pb-210 *excess* merupakan salah satu metoda yang berkembang pesat dalam 4 dasawarsa terakhir untuk mengidentifikasi redistribusi erosi tanah pada suatu lahan maupun dalam suatu catchment [5,6,7,8], untuk mengkaji perubahan organik carbon akibat erosi [9], dan untuk mengkaji keefektifan konservasi lahan [10,11,12]. Dari survey literatur penelitian erosi dalam kurun yang sama, teknik radionuklida jatuhan merupakan teknik yang terbanyak dimanfaatkan [13]. Untuk melengkapi perkiraan erosi pada kondisi seperti diterangkan di atas, teknik nuklir yang berbasis pada pengukuran kandungan radionuklida jatuhan (Cs-137, Pb-210 *excess*) dalam tanah menjadi salah satu metode alternatif. Disamping itu, radionuklida jatuhan (Cs-137, Pb-210 *excess*)

dapat memberikan informasi lain tentang redistribusi erosi tanah secara spasial, baik *gross* maupun *net* erosi pada lahan serta rasio penghantaran sedimen. Informasi yang lain adalah estimasi laju erosi merupakan laju erosi dalam skala retrospektif 40 tahun sampai 100 tahun [13,14].

Radionuklida Cs-137 merupakan isotop radioaktif yang berasal dari percobaan senjata nuklir pada dekade 1950-an sampai 1973, dan secara global telah terdeposisi ke tanah. Radionuklida Cs-137 telah dimanfaatkan untuk mengidentifikasi kualitas maupun kuantitas erosi lahan secara regional di Negara yang berlokasi di belahan bumi utara, khususnya pada lokasi berlintang tinggi, dikarenakan aktivitasnya yang secara signifikan lebih tinggi dibanding di belahan bumi selatan [15]. Dibandingkan dengan di belahan bumi utara, aktivitas Cs-137 di belahan bumi bagian selatan lebih sulit diukur karena kecilnya aktivitas deposisi dan akibat peluruhan radiaktif, serta tidak adanya lagi masukan. Phenomena ini sering menjadi kendala dalam memanfaatkan teknik Cs-137 dalam penelitian erosi di belahan Bumi Selatan umumnya dan pada daerah lintang rendah, khususnya, seperti Indonesia, dikarenakan tidak terukurnya aktivitas Cs-137 [16]. Untuk itu, kehati-hatian terkait pengukuran radionuklida jatuhan Cs-137 sangat diperlukan. Mengingat aktivitas yang akan diukur sangat kecil, maka perlu diupayakan bahwa laboratorium pengukuran harus bebas dari kontribusi sumber gamma buatan dari lingkungan.

Pada awal pemanfaatannya, radiosotop lingkungan Pb-210 *excess* banyak dikembangkan khususnya untuk menelusuri sejarah kejadian akibat aktivitas manusia terhadap lingkungan yaitu terkait dengan permasalahan laju sedimentasi dan umur sedimen [17,18,19]. Mulai tahun 1980-an, teknik Pb-210 *excess* mulai dikembangkan dalam penelitian erosi lahan, seperti halnya Cs-137. Dalam 2 dekade terakhir, pemanfaatan teknik Pb-210 *excess* dalam penelitian pola redistribusi tanah karena proses erosi [20,21] telah banyak dilaporkan

oleh peneliti di berbagai Negara maju seperti Amerika, Inggris dan Australia.

Pb-210 *excess* merupakan radionuklida lingkungan yang berasal dari peluruhan induk Uranium-238 yang ada di alam. Isotop Uranium-238 terdapat dalam kerak bumi dengan kelimpahan 99,274 %, sedangkan isotop lain yaitu Uranium-235 dan Uranium-234 berturut-turut dengan kelimpahan 0,72 % dan 0,06 % [22]. Pb-210 *excess* mempunyai waktu paruh 22,26 tahun dan meluruh menjadi Bi-214 dengan memancarkan partikel beta. Keberadaan Pb-210 *excess* dalam udara dimulai dengan peluruhan Ra-226 yang berasal dari Uranium-238 dalam kerak bumi menjadi gas Rn-222 yang berdifusi ke udara dengan rata-rata 42 atom/menit/cm² luasan permukaan tanah [23]. Rn-222 mempunyai waktu paruh 3,8 hari dan meluruh melalui deretan anak luruhnya menjadi Pb-210. Ada dua sumber pokok Pb-210 yaitu berasal dari udara sebagai partikel *aerosol* yang beterbangan dan dari tanah itu sendiri. Pb-210 *excess* akan diproduksi secara terus menerus dan aktivitas jatuhnya tidak bergantung pada waktu tetapi bergantung pada jenis batuan/tanah setempat.

Pb-210 *excess* turun kepermukaan tanah bersama air hujan atau menempel pada debu mineral yang beterbangan di udara. Pb-210 *excess* dalam tanah akan di adsorpsi partikel halus tanah secara kuat, sehingga dapat dijadikan sebagai perunut pergerakan tanah karena aliran permukaan. Jatuhan Pb-210 *excess* dari udara ke permukaan tanah dan teradsorpsi oleh partikel halus tanah dikenal sebagai Pb-210 *unsupported*. Sedangkan Pb-210 yang berasal dari tanahnya sendiri dikenal sebagai Pb-210 *supported*. Pengukuran aktivitas Pb-210 total dalam tanah dapat dilakukan melalui cuculuruhnya, yaitu Polonium-210 (Po-210) yang diasumsikan dalam keadaan keseimbangan dengan ²¹⁰Pb. Aktivitas Pb-210 *unsupported* dapat diperoleh melalui pengukuran total Pb-210 dikurangi dengan aktivitas Pb-210 *supported* yang berasal dari tanah dan diasumsikan dalam keseimbangan dengan aktivitas Ra-226 [24,25]. Dengan

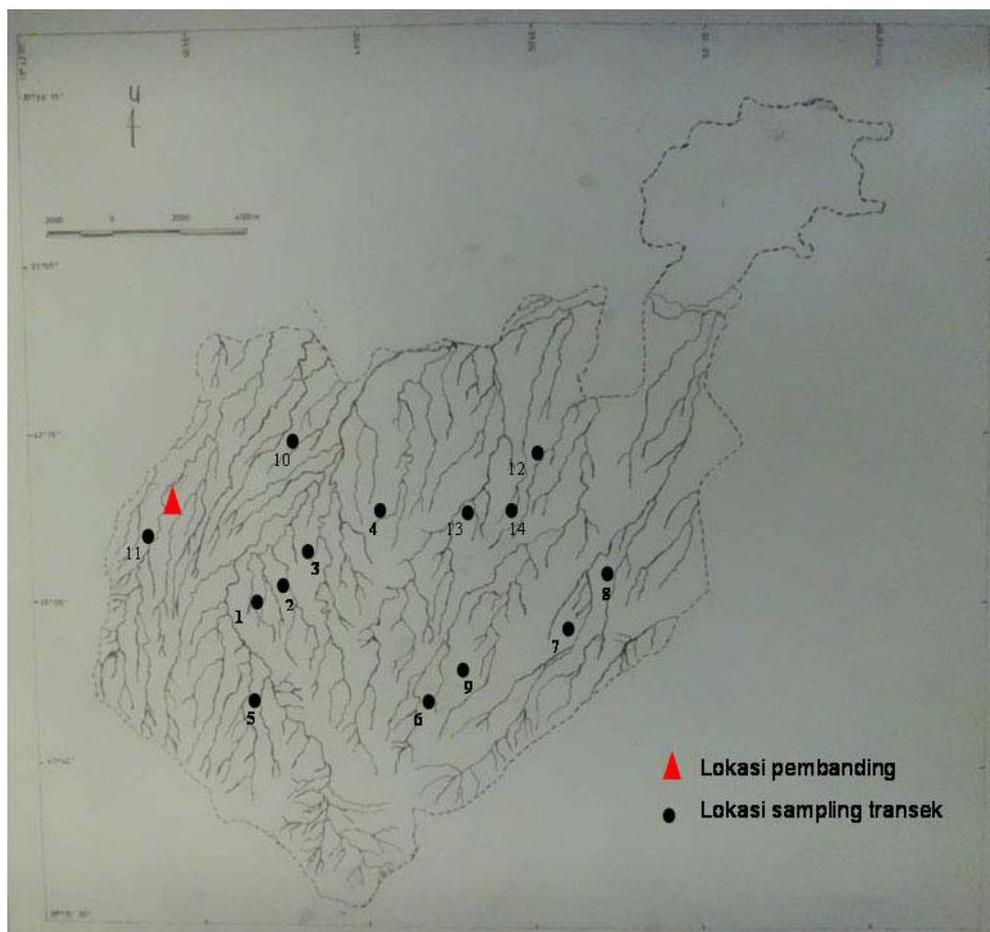
berkembangnya ilmu semikonduktor dan spektrometri, pengukuran untuk memisahkan aktivitas Pb-210 excess telah dapat dilakukan secara langsung melalui *Low Energy Detector* dengan mengukur Pb-210 pada energi 46,5 KeV sebagai total aktivitas Pb-210 dan Pb-214 pada energi 351 KeV sebagai aktivitas Pb-210 supported.

Dalam rangka untuk mengantisipasi pengembangan dan pemanfaatan ke depan, perlu dikembangkan teknik Pb-210 excess untuk penelitian terkait dengan permasalahan erosi dan deposisi. Melalui penelitian pengukuran ^{210}Pb excess serta pemanfaatan teknik radioperunut Pb-210 excess diharapkan dapat dijadikan sebagai sarana pelengkap informasi terkait estimasi laju erosi di suatu lahan akibat kegiatan pertanian yang dilakukan.

BAHAN DAN METODE

Lokasi

Penelitian dilakukan di wilayah kabupaten Nganjuk yang meliputi wilayah berbukit, bergelombang, berombak sampai datar yaitu Kec. Sawahan, Ngetos dan Loceret dengan koordinat berkisar dari $07^{\circ} 40' 45''$ sampai $07^{\circ} 45' 45''$ LS dan $111^{\circ} 45' 45''$ sampai $111^{\circ} 53' 00''$ BT, Gambar 1. Lokasi penelitian ini sebagian besar telah digunakan sebagai untuk kegiatan pertanian secara turun temurun, dan menurut informasi penggarap lahan, sebagian besar dari lahan tersebut telah dilakukan penterasan sejak tahun 1950-an.



Gambar 1. Lokasi pengambilan tanah di lokasi pembanding (merah/segitiga) dan lokasi transek (hitam)

Strategi pengambilan contoh tanah

Pengambilan contoh tanah pada lokasi pembanding

Lokasi pembanding merupakan hal yang sangat penting dalam penelitian menggunakan radionuklida jatuhnya baik itu Cs-137 maupun Pb-210 *excess*. Pengambilan sampel tanah untuk pengukuran Pb-210 *excess* sama dengan pengambilan sampel untuk pengukuran Cs-137. Mengacu pada penelitian sebelumnya dengan Cs-137 [7], maka lokasi yang sama dijadikan sebagai lokasi pembanding untuk Pb-210 *excess*

yaitu pada lokasi yang terletak di desa Talamjudes, kecamatan Sawahan. Contoh tanah diambil sedalam 30 cm. Lokasi ini merupakan lerengan (*hillslope*) dengan tutupan lahan yang baik yaitu oleh rumput dan pohon Pinus.

Pengambilan contoh tanah secara transek

Pengambilan contoh tanah pada daerah yang diteliti disesuaikan dengan keadaan topografi, tataguna lahan, jenis tanah serta kerapatan drainasi yang ada [26,27]. Dengan pendekatan demikian,

Tabel 1. Karakteristik lokasi pengambilan sampel transek

No.	Tran-sek	Kemiringan Lereng %	Vegetasi	Topographi	Lokasi (dusun, desa, kecamatan)	Jenis tanah
1.	T1	15-25	Pinus, singkong	Teras bangku "bos"	Patus, Bareng Sawahan	ALCRK
2.	T2	15-25	Rotasi tanaman	Teras bangku "bos"	Makuto, Bareng Sawahan	ALCRK
3.	T3	15-25	Kebun campuran	Teras kredit	Glagahombo, Margopatut Sawahan	LCK
4.	T4	25-40	Kebun campuran	Teras kredit	Turi, Margopatut Sawahan	LCK
5.	T5	> 40	Rotasi tanaman	Teras bangku, tanaman penguat	Ngliman, Sawahan	ACK
6.	T6	25-40	Mangga, Mahoni, bera	Teras konstruksi sipil	Kepel, sobo, Ngetos	ACK
7.	T7	15-25	Pinus, Sono, bera	Lahan berlereng	Pinusan, Bajulan, loceret	LCK
8.	T8	15-25	Jati, rumput dan sebagian singkong	Teras konstruksi sipil	Gabah, Bajulan, Loceret	LCK
9.	T9	25-40	Mahoni, Jambuan, serasah dan pisang	Lahan berlereng	Talamjudes, Klodan Ngetos	ACK
10.	T10	25-40	Jati, singkong	Lahan berlereng	Banjarsari, Sawahan	ALCRK
11.	T11	25-40	Pinus, Mahoni, Jagung, singkong	Teras, berlereng	Bendolo, Sawahan	LCK
12.	T12	15-25	Kebon campuran	Lahn berlereng	Patuk, Ngetos	LCK
13.	T13	15-25	Sono kecil, singkong, bera	Lahan berlereng	Suru, Ngetos	LCK
14.	T14	< 15	Benih tanaman Sonol, singkong, bera	Lahan berlereng	Macanan, Loceret	LCK

Catatan : "bos" = bidang olah sempit; ALCRK = asosiasi latosol coklat dan regosol kemerahan; LCK = latosol coklat kemerahan; ACK = andosol coklat kemerahan;

pengambilan contoh pada berbagai parameter tersebut diatas dilakukan melalui transek lerengan untuk mewakili tempat-tempat yang ingin diketahui erosinya. Masing-masing contoh tanah diambil sampai kedalaman 30 cm dengan alat *core*. Pengambilan contoh tanah secara transek dapat mewakili kondisi daerah yang ditinjau dan untuk menggambarkan dinamika proses erosi dalam lerengan yang diamati. Secara keseluruhan, pengambilan sampel dilakukan sebanyak 14 transek dimana jumlah titik sampel tanah yang diambil tiap transek berbeda tergantung dari kondisi lapangan. Lokasi pengambilan sampel secara transek dapat dilihat pada Gambar 1, sedangkan karakteristik lokasi pengambilan contoh transek dapat dilihat pada Tabel 1.

Penyiapan contoh dan Pengukuran aktivitas Pb-210 excess

Penyiapan contoh dilakukan dengan cara menjemur setiap contoh tanah sampai kering kemudian tanah yang masih bergumpal dipecah secara perlahan dengan cara diremas dengan tangan atau digerus sehingga semua fraksi (pasir, debu, liat)

untuk diukur kandungan Pb-210 *excess* dengan detektor low energy gamma berefisiensi relatif 50% [28]. Pengukuran Pb-210 *excess* didapatkan dengan cara mengurangkan hasil aktivitas Pb-210 total yang dalam hal ini diperoleh melalui energi 47,5 KeV dan Pb-210 *supported* yang diperoleh melalui energi 351 KeV, setelah di tutup rapat dalam wadah selama paling kurang 4 minggu untuk membiarkan terjadinya keseimbangan sekuler antara Pb-210 dengan Ra-226.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran Pb-210 excess dan inventori

1. Inventori Lokasi Pembanding

Hasil pengukuran Pb-210 *excess* pada lokasi pembanding dapat dilihat pada Tabel 2. Lokasi ini merupakan lokasi pembanding dengan tanaman utama pinus dan tutupan lahan yang baik oleh rumput. Pengukuran Cs-137 pada lokasi ini telah dilakukan [7], dengan demikian lokasi ini juga dapat diambil sebagai lokasi pembanding untuk Pb-210 *excess*.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Pb-210 *excess* dan Inventori pembanding di lokasi pembanding

No.	Luas permukaan (m ²)	Berat kering (kg)	Total ²¹⁰ Pb (Bq/kg)	Supported ²¹⁰ Pb (Bq/kg)	Excess ²¹⁰ Pb (Bq/kg)	Inventory (Bq/m ²)
RS-1	0.00363	1.0616	19	12.51	6.49	1898.01
RS-2	0.00363	1.1426	22.12	13.07	9.05	2848.63
RS-3	0.00363	1.1084	20.48	12.23	8.25	2519.09
RS-4	0.00363	0.8332	23.02	11.71	11.31	2596.00
Inventori rerata						2465

terpisah. Tanah yang sudah kering ditimbang terlebih dahulu sebelum dilakukan pengerusan bila diperlukan. Tanah kemudian diayak menggunakan ayakan dengan bukaan 2 mesh untuk memisahkan fraksi pasir kasarnya. Fraksi yang lolos tersebut diaduk sampai homogen dan sebanyak 250 gr diambil dan dikirim ke Laboratorium Chinese Academy of Agriculture and Soil Science, Beijing, China

Nilai inventori dari empat titik pembanding bervariasi dengan rentang nilai sekitar 1900 sampai sekitar 2850 Bq/m². Nilai rerata inventori dari 4 contoh pada pembanding adalah 2465 Bq/m² dan *standar error meannya* (SEM) adalah 175 Bq/m². Dengan mengambil 95 % batas kepercayaan maka nilai inventori pembanding adalah (2465 ± 280) Bq/m². Atau nilai inventori Pb-210 *excess* dengan 95 % selang kepercayaan

mempunyai nilai diantara 2185 Bq/m² sampai dengan 2745 Bq/m². Inventori diantara kedua nilai ini secara kualitatif dikatakan sebagai nilai transisi atau tidak mengalami erosi atau deposisi.

Untuk mengkuantifikasi erosi, diperlukan nilai inventori tunggal Pb-210 *excess* sebagai salah satu parameter masukan yang akan digunakan sebagai inventori pembandingan. Nilai inventori tunggal Pb-210 *excess* tersebut adalah inventori rerata Pb-210 *excess* yaitu 2465 Bq/m².

2. Aktivitas dan Inventori Pb-210 *excess*

Hasil pengukuran aktivitas Pb-210 *excess* tiap titik contoh dinyatakan dalam Bq/kg, dimana diperoleh dari pengurangan langsung antara Pb-210 total dengan Pb-210 *supported*. Agar dapat digunakan dalam model konversi, aktivitas tersebut dikonversi dalam bentuk aktivitas kumulatif persatuan luas (inventori) dengan satuan Bq/m². Dari hasil pengukuran contoh tanah, ada beberapa contoh menunjukkan hasil ukur aktivitas Pb-210 *excess* bernilai negatif. Untuk hal-hal seperti ini, aktivitasnya diganti dengan limit deteksi alat. Untuk contoh tanah yang mempunyai nilai Pb-210 *excess* (nilai aktivitas Pb-210 total dikurang aktivitas Pb-210 *supported*) berharga <2,85 Bq/kg, inventori pada titik contoh tanah tersebut diberikan nilai 2,85 Bq/kg sesuai dengan limit deteksi^[28].

Dengan mengkonversi aktivitas Pb-210 *excess* ke inventori tiap contoh dalam satu transek dapat dijadikan sebagai indikator langsung secara kualitatif titik contoh yang mengalami erosi atau deposisi atau transisi. Apabila nilai inventori contoh lebih kecil dari batas bawah inventori pembandingan (2185 Bq/m²), maka pada titik contoh tersebut telah mengalami erosi, sedangkan inventori yang lebih tinggi dari batas atas (2745 Bq/m²) menunjukkan telah terjadi deposisi pada titik contoh tersebut. Sedangkan nilai inventori yang terletak pada kedua nilai tersebut sebagai titik-titik transisi. Demikian untuk seterusnya, sehingga dengan melihat hasil konversi nilai Pb-210 *excess* secara kualitatif dapat

diketahui dimana terjadi erosi dan dimana terjadi deposisi atau transisi dalam suatu lahan.

Estimasi Laju Erosi

Meskipun secara kualitatif muncul istilah titik erosi, deposisi dan transisi, namun dalam analisis secara kuantitatif hanya dikenal titik erosi dan deposisi. Estimasi laju erosi dan deposisi ditentukan melalui konversi keseimbangan massa dan dihitung dengan memasukkan harga inventori tiap titik dan parameter input lain yang diperlukan ke dalam soft ware radiocalc yang telah diinstall pada add-on microsoft excell. Beberapa asumsi parameter input yang digunakan antara lain adalah tahun mulainya pengolahan tanah, kedalaman olah tanah, koefisien relaksasi (H), γ faktor dan kedalaman olah tanah. Adapun faktor koreksi ukuran partikel tidak dipertimbangkan, sehingga diambil nilai satu (1) baik untuk titik erosi maupun deposisi. Seluruh data estimasi erosi-deposisi pada titik-titik contoh diperoleh dengan asumsi pengolahan dimulai sejak tahun 1963. Pada model konversi ini, Pb-210 *excess* dalam tanah dipertimbangkan homogen sampai kedalaman olah 30 cm.

Dengan mempertimbangkan jenis tanah yang berbeda, besaran parameter H dan γ diberikan nilai berbeda untuk jenis tanah yang berbeda. Pada jenis tanah asosiasi latosol coklat dan regosol kemerahan (ALCRK), latosol coklat kemerahan (LTK) dan andosol coklat kemerahan (ACK) diberikan nilai masing-masing adalah H=3,5 kg/m² dan $\gamma=0,5$; H=3,75 kg/m² dan $\gamma=0,45$ serta H=4,0 kg/m² dan $\gamma=0,4$. Ringkasan parameter yang digunakan dan hasil estimasi erosi ditunjukkan pada Tabel 3.

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa laju erosi pada ketiga macam jenis tanah yaitu ALCRK (asosiasi latosol coklat dan regosol kemerahan), LCK (latosol coklat kemerahan) dan ACK (andosol coklat kemerahan), bervariasi dari kisaran 5 ton/ha/th sampai mendekati 100 ton/ha/th. Mengacu pada hasil estimasi erosi dengan teknik Cs-137 [7],

Table 3. Parameter yang dipakai, gross dan net erosi berdasar Pb-210 *excess*

Transek	Parameter			Gross erosi (ton/ha/yr)	Net erosi (ton/ha/yr)	SDR (%)	Jenis tanah
	H (kg/m ²)	γ	kedalamam olah tanah (kg/m ²)				
T1	3.5	0.5	303	24,7	17,6	71	ALCRK
T2	3.5	0.5	334	41,5	24,9	60	ALCRK
T3	3.75	0.45	311	59,6	59,6	100	LCK
T4	3.75	0.45	343	76,5	76,5	100	LCK
T5	4.0	0.4	303	49,5	26,6	54	ACK
T6	4.0	0.4	331	96,4	96,4	100	ACK
T7	3.75	0.45	372	79,3	79,3	100	LCK
T8	3.75	0.45	339	46,2	5,4	12	LCK
T9	4.0	0.4	307	21,5	4,9	23	ACK
T10	3.5	0.5	317	55,5	55,5	100	ALCRK
T11	3.75	0.45	305	45,7	45,7	100	LCK
T12	3.75	0.45	322	69,0	69,0	100	LCK
T13	3.75	0.45	319	97,3	97,3	100	LCK
T14	3.75	0.45	306	61,0	61,0	100	LCK

Catatan : ALCRK = asosiasi latosol coklat dan regosol kemerahan; LCK = latosol coklat kemerahan dan ACK = andosol coklat kemerahan.

dapat dibuat perbandingan seperti terlihat pada Tabel 4.

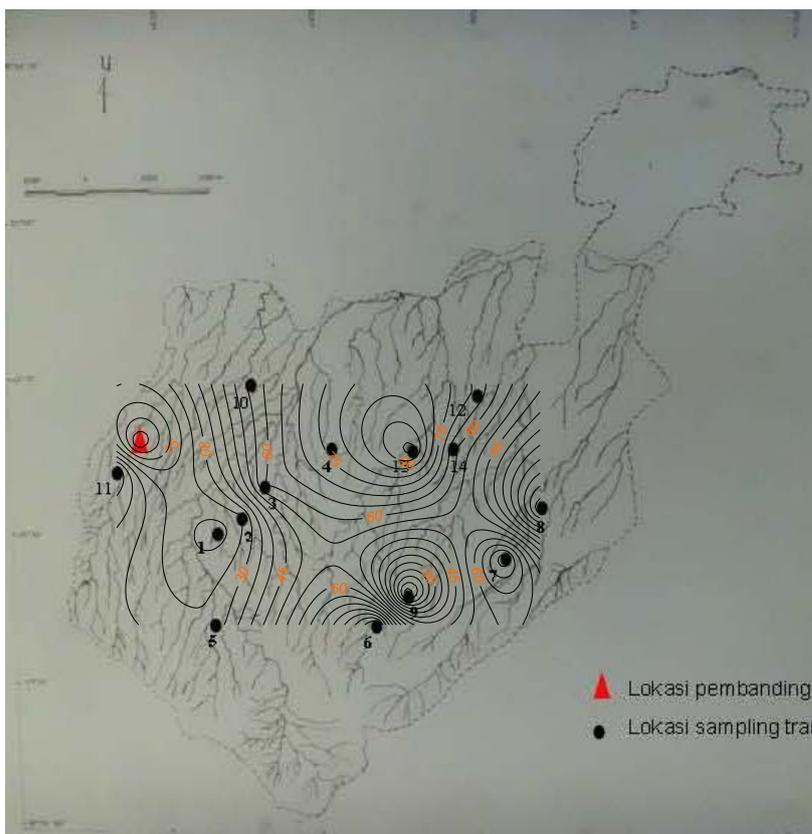
Dari Tabel 4, secara umum terlihat bahwa estimasi laju erosi yang diperoleh berdasarkan pengukuran Pb-210 *excess* memberikan hasil yang lebih kecil dibandingkan dengan estimasi laju erosi berdasarkan Cs-137, dan dapat dilihat dengan gambaran iso-erosinya pada Gambar 2. Hal ini disebabkan adanya hasil

pengukuran aktivitas yang tidak terdeteksi oleh alat dan asumsi nilai yang diberikan sama dengan limit deteksi alat^[7,22]. Padahal kondisi sebenarnya boleh jadi berbeda untuk setiap titik contoh tanah yang tidak terdeteksi aktivitas radionuklida jatuhnya.

Ditinjau dari aspek konservasi tanah secara fisik maupun vegetatif dan kelas kelerengan tanah, dapat diamati hal-hal berikut. Dari Tabel 1 dan Tabel 3 terlihat

Tabel 4. Perbandingan estimasi erosi berdasarkan Pb-210 *excess* dan Cs-137

Transek	Teknik Pb-210 <i>excess</i>		Teknik Cs-137	
	Laju erosi (ton/ha/th)	SDR (%)	Laju erosi (ton/ha/th)	SDR (%)
T1	17,6	71	96,7	100
T2	24,9	60	78,6	100
T3	59,6	100	88,4	100
T4	76,5	100	112	100
T5	26,6	54	54	91
T6	96,4	100	119,4	100
T7	79,3	100	117,7	100
T8	5,4	12	37,7	80
T9	4,9	23	2,3	17
T10	55,5	100	76,2	100
T11	45,7	100	91,4	100
T12	69,0	100	96,8	100
T13	97,3	100	108,3	100
T14	61,0	100	62	100



Gambar 2. Iso-erosi berdasarkan estimasi erosi Pb-210 *excess* pada Tabel 4.

bahwa laju erosi terkecil pada kemiringan lereng antara 15-25 % diperoleh sebesar 5,4 ton/ha/th yaitu pada transek-8 (T8). Pada transek-8 (T-8), kondisi lahannya telah menerapkan konservasi tanah secara fisik dalam bentuk teras bangku dan tidak dilakukan pengolahan secara intensif. Kemudian laju erosi semakin membesar pada transek T1, T2, T3, T12, T7 dan terbesar adalah transek T-13 dengan laju erosi berkisar 97,3 ton/ha/th.

Dari kelerengan lahan antara 25-40 % yang terdiri dari 5 transek yaitu T-4, T6, T-9, T-10 dan T-11, terlihat bahwa laju erosi terendah terdapat pada transek-9 (T-9) berkisar 4,9 ton/ha/th yang kondisi lahannya berlereng dengan vegetasi tanaman keras dan tanah tidak diolah serta tutupan lahan sangat baik. Laju erosi semakin membesar berturut-turut pada transek T11, T10, T4 dan yang paling besar terjadi pada transek T6 sebesar 96,4 ton/ha/th.

Seperti terjadi pada kelerengan lahan antara 15-25 %, hal yang sama juga terjadi pada kelerengan lahan 25-40 %, dimana variasi laju erosi dapat terjadi pada jenis tanah yang sama. Dari Tabel 1 dan Tabel 3 juga dapat terlihat kecenderungan yang sama bahwa tindakan konservasi lahan secara fisik dan vegetatif merupakan faktor signifikan dalam mengendalikan laju erosi. Namun demikian, tindakan konservasi tanah secara vegetatif dengan tutupan lahan adalah faktor yang lebih signifikan dari tindakan konservasi secara fisik.

Pengaruh tindakan konservasi tanah terhadap laju erosi semakin nyata terlihat pada pengambilan sampel transek pada kelerengan < 15% dan >40% masing-masing 1 transek yaitu T14 dan T5 memberikan laju erosi masing-masing 61 ton/ha/th dan 26,6 ton/ha/th. Pada kedua transek ini memberikan gambaran lebih jelas bahwa pada kelerengan lahan yang

kecilpun terjadi erosi yang cukup besar karena minimnya tindakan konservasi tanah yang diterapkan (T14), sedangkan dengan penerapan tindakan konservasi berupa penterasan dan penerapan tanaman penguat teras (*hedgerose*), erosi yang terjadi dapat ditekan (T5).

Dari Tabel 1 dan Tabel 3 diperoleh informasi yang cukup jelas bahwa meskipun sebagian besar lahan telah berteras, erosi tetap terjadi. Dengan kata lain, untuk mencegah erosi dipercepat pada pemanfaatan lahan berlereng yang masih potensial di Indonesia ini, ternyata tidak cukup dilakukan upaya secara fisik saja, akan tetapi harus juga dilakukan bersama-sama dengan teknik pengendalian secara vegetatif serta budidaya tanaman yang sesuai dengan daya dukung lahan.

Rasio penghantaran sedimen (*sediment delivery ratio/SDR*)

Rasio penghantaran sedimen didefinisikan sebagai perbandingan antara erosi bersih dengan gross erosi dalam satu transek suatu bidang olah. Dengan definisi demikian dapat diketahui adanya berbagai rasio penghantaran sedimen dari satu transek ke transek yang lain seperti ditunjukkan dalam Tabel 3 dan Tabel 4, dengan karakteristik lahan seperti Tabel 1. Dari tabel-tabel tersebut diketahui bahwa kebanyakan transek mempunyai nilai SDR 100 %. Adapun nilai SDR kurang dari 100% terjadi pada lahan yang menerapkan tindakan konservasi lahan baik secara fisik maupun vegetatif. Hal demikian ditunjukkan dalam 5(lima) transek (T1,T2, T5, T8 dan T9), dan masing-masing mempunyai rasio penghantaran sedimen berturut-turut 71%, 60%, 54%, 12% dan 23%. Transek T9 merupakan satu-satunya transek yang tidak menerapkan tindakan konservasi secara fisik namun menerapkan tindakan secara vegetatif terkait denganutupan lahan yang baik dan relatif tidak dilakukan pengolahan tanah. Pada transek lain dengan topografi/kondisi lahan berlereng denganutupan lahan sangat minim memberikan rasio penghantaran

sedimen 100%. Sebaliknya, pada lahan berteras dengan olah tanah yang cukup intensif (tanaman semusim) danutupan lahan yang kurang baik juga memberikan rasio penghantaran sedimen 100%. Fakta ini memberikan penguatan informasi bahwa tindakan vegetatif berupautupan lahan dan olah tanah minim agaknya merupakan faktor signifikan yang mempengaruhi erosi. Dengan kata lain, tindakan konservasi lahan untuk mencegah erosi yang optimal akan dapat dilakukan dengan penerapan bersama baik secara fisik maupun vegetatif terkait dengan olah tanah minim danutupan lahan secara baik.

KESIMPULAN

Dalam estimasi laju erosi menggunakan radioperunut Pb-210 excess ini, inventori pembandingan Pb-210 excess sebesar 2465 Bq/m² dijadikan nilai inventori untuk mengestimasi laju erosi daerah berlereng di daerah kawasan Nganjuk, Jawa Timur. Laju erosi berdasarkan pengukuran Pb-210 excess dari lokasi satu dan lokasi lainnya memberikan hasil bervariasi yaitu berkisar 5 ton/ha/th sampai mendekati 100 ton/ha/th dan memberikan nilai rasio penghantaran sedimen dari 12% sampai 100%. Rasio penghantaran sedimen 100 % terjadi pada lahan yang tidak menerapkan tindakan konservasi fisik dan vegetatif, dan dicirikan denganutupan lahan yang minim. Hasil penelitian ini juga mengungkapkan bahwa proses erosi di daerah berlereng di daerah Nganjuk terjadi baik pada lahan berlereng maupun berteras, dan terjadi pada semua jenis tanah; dan laju erosi tersebut semakin besar pada lahan yang tidak menerapkan tindakan konservasi secara fisik dan vegetatif bersama-sama.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada seluruh staf teknis group sedimentologi-PAIR atas bantuan

melakukan perlakuan sampel yang telah diambil dan penyiapan peralatan lain. Tidak lupa pula penulis ucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. Li Yong beserta staff yang telah membantu mengukur sampel di Laboratorium CAAS, Beijing. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada para reviewer dengan segala koreksi dan masukannya, sehingga karya tulis ini dapat dipublikasikan.

DAFTAR PUSTAKA

1. PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN TANAH DAN AGROKLIMAT, Teknologi Pengelolaan Lahan Kering Menuju Pertanian Produktif dan Ramah Lingkungan, BPPP-Departemen Pertanian (2002).
2. HERAWATI, T., "Analisis Spatial Tingkat Bahaya Erosi di Wilayah DAS Cisadane Kabupaten Bogor", Pusat Litbang Hutan dan Konservasi Alam (2010).
3. TRIYATNO JOKO, Analisis Erosi dan Konservasi Tanah di Kecamatan Ngadirojo Kabupaten Wonogiri, Sripsi Program Studi Geografi, UMS (2009).
4. SARI LUBIS, K. dan ABDUL RAUF, "Indeks Bahaya Erosi pada Beberapa Penggunaan Lahan Inceptisol Desa Telagah Kecamatan Sei Bingei Kabupaten Langkat", Perpustakaan digital Ilmu Tanah Fakultas Pertanian, USU (2003).
5. YANG, Y.H., YAN, B.X., and ZHU H., "Estimating Soil Erosion in Northeast China Using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ", *Pedosphere*, 21-6, 706-711 (2011).
6. PORTO, P. ET, Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion in the small catchment in southern Italy, *Journal of Water, Air and Soil Pollution*, 6, 657-667 (2006).
7. BAROKAH, A., dan RAHMADI, S., Estimasi laju erosi lahan berlereng di Kabupaten Nganjuk dengan teknik Cs-137, *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*, 5 (2), 129-146 (2009).
8. MATISOFF, G., BONNIWELL, B.C., and WHITING, P.J., Soil erosion and sediment sources in an Ohio Eatershed using Beryllium-7, Cesium-137 and Lead-210, *Journal of Environemnt Quality*, 31, 54-61 (2002).
9. LI YONG, ET AL, Changes in soil organic carbon induced by tillage and water erosion on a steep hillslope in the Chinese loess plateau from 1898-1954 and 1954-1998, *Journal of Geophysical Research*, 112, 2005-2012 (2007).
10. MABIT, L., BENMANSOUR, M., WALLING D.E., Comparative advantages and limitations of fallout radionuclides ^{137}Cs , ^{210}Pb and ^7Be to assess soil erosion and sedimentation, *Journal of Environmental Radioactivity*, 99 (12), 1799-1807 (2008).
11. GOLOSOV V.N. ET AL' "Application of the Radionuclide Technique and Other Methods for Assessing the Effectiveness of Soil Conservation Measures at the Novosil Study Site, Orel Region, Central Russia", In: Impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality, IAEA-TECDOC-1665, 131-157 (2011).
12. LI YONG ET AL., "Assessment of Effectiveness of Soil Conservation Measures in Reducing Soil Erosion and Improving Soil Quality in China Using Fallout Radionuclide Techniques", In: Impact of soil

- conservation measures on rosiion control and soil quality, IAEA-TECDOC-1665, 207-224 (2011).
13. GUZMAN, G. ETAL, Sediment tracers in water erosion studies: current approach and challenge, *Journal of Soils Sediment*, **13**, 816-833 (2013).
 14. HE, Q., and WALLING, D.E., The redistribution of fallout Cs-137 and Pb-210 in undisturbed and cultivated soil, *Journal of Application of Radiation and Isotopes*, **48**, 677-690 (1997).
 15. WALLING, D.E., and Q. HE., Model for converting Cs-137 measurement to estimates of soil redistribution rates on cultivated and uncultivated soils, and estimating bomb-derived Cs-137 refference inventory; a contribution to IAEA Coordinated Programs on soil erosion and sedimentation, Vienna (2001).
 16. BAROKAH, A., Model Estimasi aktivitas Cs-137 dalam contoh tanah melalui persentase organik karbon dan debu-liat, *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*, **3** (2), 11-24 (2007).
 17. ALI, A.L, and BAROKAH, A., Preliminary study of sediment ages and accumulation rates in Jakarta bay derived from depth profile of unsupported Pb-210, *Indonesian Journal of Chemistry*, **6** (3), 256-260 (2006).
 18. EAKINS, J.D., The ²¹⁰Pb Technique for dating sediments and some applications, IAEA-TECDOC-298, 31-47, Vienna (1983).
 19. BAROKAH, A., dan ALI, A.L., Fluks deposisi Zn dan Cr di muara Cisadane berdasarkan profil Pb-210 unsupported dan siklus banjir 5 tahunan, *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*, **3** (1), 27-39 (2007).
 20. WALLING, D.E., COLLINS, A.L, and SICHINGABULA, H.M., Using unsupported lead-210 measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small Zambian catchment, *Geomorphology, Elsevier*, **52** (3), 193-213 (2003).
 21. BAROKAH, A., TOMMY, H., dan NITA, S., Laporan Teknis Pengembangan dan Aplikasi Teknik Isotop Alam untuk Penentuan Laju Erosi pada Skala Catchment, PATIR-BATAN (2010).
 22. LAV, STANIS and MARES., Introduction to Applied Geophysics, Charles Univ., D. Radel Publishing Company, Praque (1984).
 23. SCHELL, W.R., and NEVISSI, A., Sediment in Lake and Reservoirs, IAEA (1983).
 24. WIELAND E. et al., Scavenging of Chernobyl ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb in Lake Sempach, Switzerland, *Geochimica et Cosmochemica Acta*, **57**, Pergamon Press Ltd. (1993).
 25. IAEA, Use of Nuclear Techniques in Studying Soil Erosion and Siltation, IAEA-TECDOC-828, Vienna (1993).
 26. DEPARTEMEN KEHUTANAN, Peta Indeks Panjang dan Kemiringan Lereng (LS), SUB DAS WIDAS, Daerah Aliran Sungai Brantas (2002).
 27. DEPARTEMEN KEHUTANAN, Peta Jenis Tanah dan Peta Erodibilitas Tanah (K), SUB DAS WIDAS, Daerah Aliran Sungai Brantas (2002).
 28. LI YONG., "Private communication", Institute of Agro-Environment dan Sustainable Development Beijing, China.