

PERAN TEKNIK ISOTOP DALAM PENGELOLAAN BENDUNGAN DAN WADUK

Paston Sidauruk

Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi, BATAN

ABSTRAK

Rembesan, kebocoran, dan kualitas dan kuantitas air waduk adalah bagian dari masalah yang biasa dalam pengelolaan bendungan dan waduk. Teknik isotop adalah salah satu teknik yang tersedia untuk menyelesaikan masalah ini. Peran teknik isotop dalam pengelolaan bendungan dan waduk telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dan telah digunakan secara luas. Di Indonesia, penggunaan teknik isotop dalam pengelolaan bendungan dan waduk dapat dirunut balik dari tahun 1969 yaitu pada penyelidikan kebocoran di bendungan Sempor. Untuk mendemonstrasikan peran penting teknik isotop dalam pengelolaan bendungan dan waduk, tiga kasus disajikan dalam tulisan ini yaitu: penyelidikan asal-usul air keluaran di bendungan Wlingi, Jawa Timur; penyelidikan stratifikasi air waduk di waduk Jatiluhur, Jawa Barat, dan penyelidikan kebocoran/rembesan di bendungan Sengguruh, Malang. Dari 3 kasus ini dapat dilihat bahwa teknik isotop tidak hanya berperan sebagai teknik alternatif tetapi juga dapat sebagai teknik yang unggul dalam penyelesaian masalah yang berhubungan dengan pengelolaan bendungan dan waduk.

ABSTRACT

Seepages, leakages, and reservoir water quality/quantity are among the common problems in dam and reservoir management. Isotopes technique is one of the techniques that is available for this purpose. The role of isotope technique in dam and reservoir management has shown promising results and widely used. In Indonesia, the practice of using isotope technique as a tool in dam safety and leakage management can be traced back as early as in 1969 during the investigation of suspected leakages in Sempor dam. For the purpose of demonstrating the important role of isotope technique in dam and reservoir management, 3 case studies namely the investigation of the origin of the discharge water in Wlingi dam, East Java; the investigation of reservoir water stratification in Jatiluhur reservoir water, West Java; and the investigation of leakages/seepages in Sengguruh dam, East Java. Through these 3 case studies, it is demonstrated that the isotopes technique does not only as an alternative but also as a leading technique in solving the problems.

PENDAHULUAN

Bendungan dan waduk adalah salah satu jenis bangunan yang telah ada sejak peradapan manusia ada. Pada mulanya bendungan hanya digunakan untuk menampung air yang akan digunakan untuk tujuan pemenuhan kebutuhan air sehari-hari dan irigasi pertanian. Namun sesuai dengan perkembangan peradapan manusia dan teknologi bendungan, waduk juga berkembang dan berfungsi ganda. Bendungan dan waduk tidak hanya berfungsi sebagai pendukung sistem irigasi yang baik tetapi dapat juga berfungsi untuk hal lain seperti penyedia tenaga listrik dan pengendali banjir. Dalam sejarah perkembangan bendungan dan waduk, bendungan yang pernah dibangun manusia telah mengalami beberapa masalah yang tidak hanya mengancam keselamatan bendungan itu sendiri tetapi juga membahayakan kehidupan manusia. Untuk itu, sistem pengelolaan bendungan dan waduk yang dapat menjamin keselamatan

bendungan dan melindungi kehidupan manusia perlu diimplementasikan.

Pada pengelolaan bendungan dan waduk, rembesan atau bocoran adalah salah satu masalah yang sering dihadapi (1-4). Penanganan masalah kebocoran adalah sangat penting karena tidak hanya menyangkut masalah kehilangan air tetapi yang paling penting adalah menyangkut keselamatan bendungan itu sendiri.

Dalam sejarah perkembangan bendungan itu sendiri telah banyak dicatat peristiwa kegagalan sistem keamanan bendungan yang mengakibatkan malapetaka besar bagi kehidupan manusia. Misalnya: kegagalan bendungan Malpaset (Perancis), Vajont (Italia), Sempor (Indonesia), dan Teton (Amerika) (1,2). Dalam peristiwa kegagalan bendungan ini tidak hanya harta benda yang hilang, tetapi banyak nyawa manusia yang turut hilang. Perlu juga dicatat dalam peristiwa kegagalan bendungan ini kadang-kadang tidak menunjukkan kelainan fisik yang nyata sebelum

kegagalan itu terjadi (4). Untuk itu, pengawasan secara berkala dan berkesinambungan dan pengendalian bocoran dan rembesan perlu dilakukan.

Dalam makalah ini disajikan aplikasi teknik perunut khususnya teknik isotop dalam pekerjaan pemantauan kebocoran dan rembesan waduk suatu bendungan. Teknik ini diantaranya meliputi (2,3):

1. menentukan asal-usul air keluaran di sekitar bendungan,
2. mempelajari inter-koneksi antara air keluaran di sekitar bendungan dengan air waduk,
3. mempelajari strata (lapisan) dari formasi bendungan,
4. menentukan arah dan laju aliran,
5. melokalisir daerah bocoran di dasar bendungan.

Dilihat dari jenis perunut yang dipergunakan, teknik perunut dapat dibagi dua yaitu teknik perunut alam dan teknik perunut buatan. Setiap bahan perunut mempunyai kelebihan dan kelemahan masing-masing. Untuk itu, para ahli menganjurkan untuk menggunakan sebanyak mungkin perunut yang dapat diperoleh atau yang ada (1,2). Walaupun ada kecenderungan akhir-akhir ini untuk memprioritaskan penggunaan perunut alam, tetapi untuk penentuan daerah bocoran di dasar bendungan hanya dapat dikerjakan dengan bahan perunut buatan.

TEKNIK ISOTOP

Teknik Isotop Alam

Teknik ini sangat berguna pada fase awal dalam penyelidikan kebocoran pada bendungan maupun pada penelitian kuantitas dan kualitas air waduk. Bahan perunut alam yang sangat penting diantaranya adalah isotop alam dan garam terlarut dari air itu sendiri. Disamping itu sebagai penunjang dapat digunakan perunut alam lain seperti temperatur dan konduktivitas dari sumber air yang diteliti. Teknik ini antara lain dapat digunakan untuk melihat hubungan antara sumber air yang muncul di sekitar bendungan dengan air waduk. Untuk tujuan ini, contoh air dari mata air dan air waduk diambil dari berbagai sumber secara berkala untuk jangka waktu tertentu. Keterhubungan antara mata air dan air waduk tersebut dapat ditentukan dari korelasi antara perunut alamnya. Jika air keluaran yang dicurigai berasal dari air waduk maka komposisi isotop alam dan kelimpahan hidro-kimia dari kedua sumber tersebut tidak jauh berbeda. Namun demikian, dalam setiap analisis dan interpretasi hasil kemungkinan percampuran dengan air tanah

setempat harus selalu diperhitungkan. Untuk tujuan ini, di dalam pekerjaan dengan teknik perunut dianjurkan untuk mengumpulkan contoh air dari berbagai sumber yang berbeda seperti air hujan, sumur penduduk, air tanah, dan mata air di samping air waduk itu sendiri. Di antara perunut isotop alam yang sangat penting dan sering digunakan adalah isotop dari atom pembentuk molekul air yaitu oksigen-18 dan deuterium (1-3). Interpretasi dengan demikian dapat didasarkan terhadap kenyataan bahwa hubungan antara kelimpahan relatif isotop alam deuterium (δD) dan kelimpahan relatif ($\delta^{18}O$) adalah linear (5,6). Hubungan antara kelimpahan deuterium (δD) dan oksigen-18 ($\delta^{18}O$) suatu contoh air dapat ditulis dengan persamaan : $\delta D = A \delta^{18}O + B$, dimana $A = 8$ untuk air hujan dan B tergantung dari faktor geografis suatu daerah. Sebagai contoh untuk air hujan yang diperoleh dari 91 stasiun bumi seluruh dunia diperoleh hubungan: $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$ (5,6). Persamaan ini selanjutnya disebut dengan *Global Meteoric Water Line* (MWL). Untuk Indonesia para peneliti BATAN melalui beberapa stasiun penadah hujan di beberapa tempat di Indonesia memperoleh hubungan berikut : $\delta D = 8 \delta^{18}O + 14$ (7). Untuk suatu contoh air yang telah mengalami proses penguapan seperti halnya air waduk biasanya akan mengalami fraksionasi yang mengakibatkan harga slope A menjadi lebih kecil dari 8. Sebagai contoh, Sidauruk, P. (1987) (8) mendapatkan garis penguapan untuk suhu rata-rata 30 °C dan kelembaban relatif 57 % sbb: $\delta D = 4,54 \delta^{18}O - 10,17$.

Teknik Isotop Buatan

Teknik ini seperti telah disinggung pada awal tulisan ini sangat bermanfaat untuk menentukan lokasi kebocoran di dasar waduk. Prinsip pelaksanaan pekerjaan ini adalah dengan *me-label* (menandai) air waduk atau sebagian dari air waduk pada tempat yang dicurigai dengan zat perunut radioaktif. Sifat perunut radioaktif yang memancarkan radiasi sangat memudahkan pemantauan dinamika air yang telah ditandai tersebut dengan bantuan alat deteksi yang mempunyai tingkat sensitivitas tinggi terhadap energi radiasi.

Sesuai dengan perannya yang harus dapat mewakili dinamika air yang diteliti, maka perunut radioaktif yang digunakan harus memenuhi beberapa syarat antara lain :

1. dapat bercampur dengan mudah dengan air dan mempunyai sifat dinamika seperti air,
2. sifat fisika dari perunut tidak berubah oleh kondisi yang berbeda,

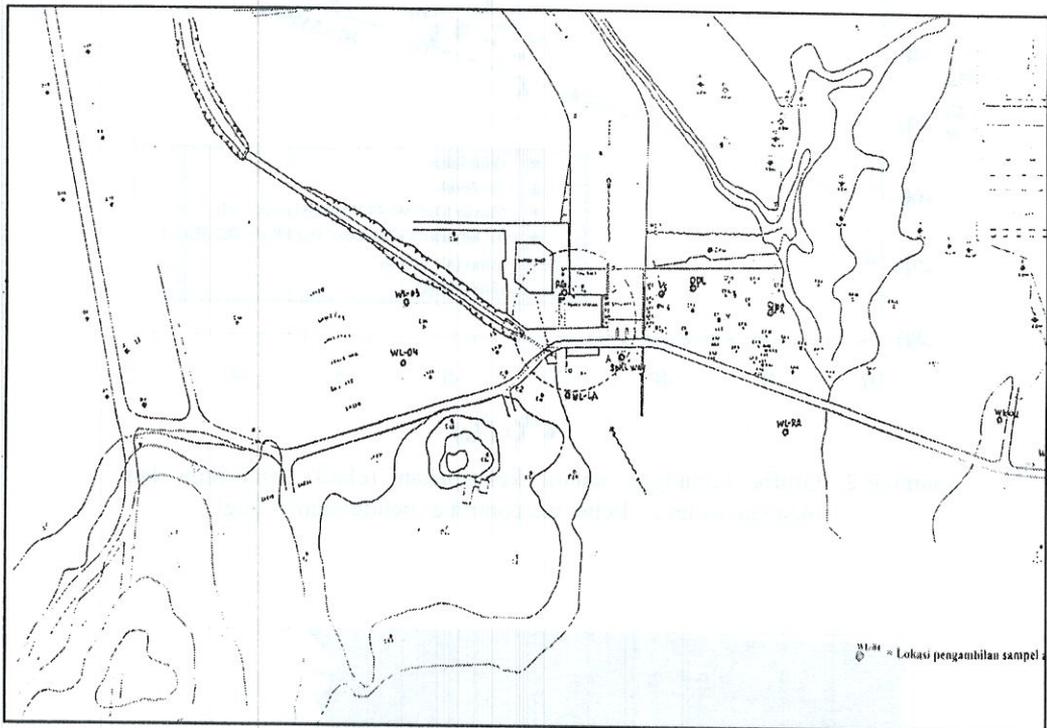
3. tingkat toksitas atau radio-toksitas dari perunut berada dalam tingkat yang relatif rendah (yang diizinkan),
4. penanganannya relatif mudah,
5. tersedia dalam jumlah yang cukup dengan kontinuitas terjamin.

Disamping sifat yang diharapkan dimiliki oleh perunut tersebut di atas, pengetahuan tentang batas deteksi minimum (*MDL*) dari alat deteksi yang digunakan, waktu paro, dan konsentrasi maksimum yang diizinkan (*MPC*) adalah hal yang mutlak diketahui untuk membantu perencanaan dan pelaksanaan pekerjaan tersebut.

STUDI KASUS

Penyelidikan Asal-Usul Air Keluaran di Bendungan Wlingi

Penelitian ini dilakukan untuk menyelidiki asal-usul air keluaran yang terdapat di sekitar bendungan Wlingi, Blitar, Jawa Timur (7). Bendungan Wlingi yang berlokasi sekitar 8 km dari kota Blitar, Jawa Timur adalah bendungan serba guna dengan tipe *earth fill*. Di sekitar bendungan terdapat beberapa air keluaran yang dicurigai berasal dari air bocoran atau resapan dari waduk bendungan. Dalam hal seperti ini, asal-usul



Gambar 1. Lokasi pengambilan contoh air di sekitar bendungan Wlingi

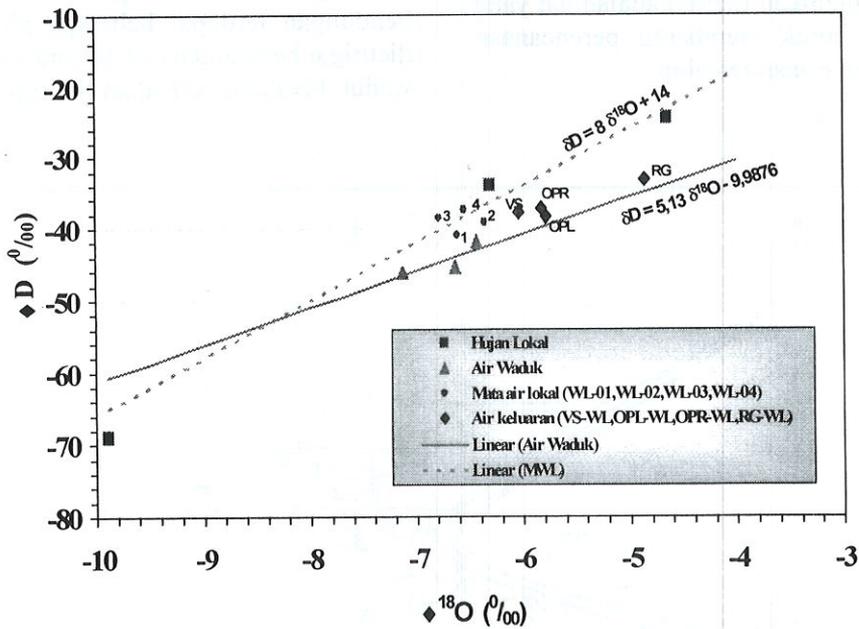
Dalam pelaksanaannya, larutan perunut radioaktif diinjeksikan ke dalam waduk dan dibiarkan untuk waktu tertentu. Air yang telah tercampur dengan perunut akan bergerak sesuai dengan dinamika air dalam waduk. Sebagian dari perunut yang menyentuh dasar waduk akan terabsorpsi oleh butiran padat pada dasar waduk dan sebagian akan mengalir menuju kebocoran yang pada akhirnya keluar dari waduk tersebut. Dengan demikian, dengan melakukan pengukuran konsentrasi perunut di dasar waduk dan menggambarkan iso-kontur dari perunut tersebut dapat ditentukan tempat yang dicurigai sebagai tempat bocoran pada dasar waduk tersebut.

air keluaran tersebut perlu diketahui sebelum langkah selanjutnya diambil. Salah satu teknik yang tersedia untuk menentukan asal-usul air keluaran tersebut adalah teknik perunut alam isotop stabil seperti diterangkan di atas. Untuk itu, beberapa contoh diambil dari beberapa sumber yaitu dari air keluaran di sekitar bendungan, air waduk, air tanah lokal dan air hujan. Untuk melihat konsistensi atau perubahan sebagai fungsi waktu, pengambilan contoh dilakukan secara berkala.

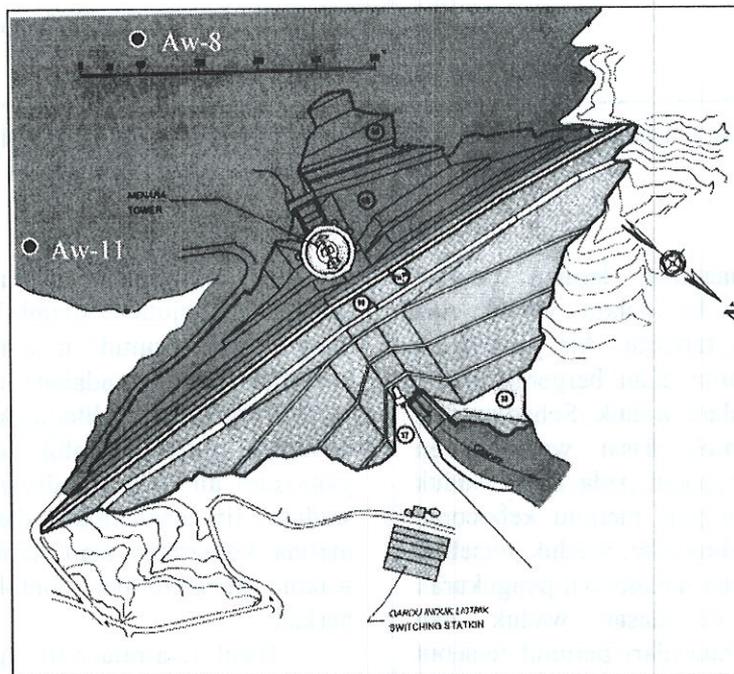
Hasil rata-rata dari tiga kali pengambilan contoh yang berselang 1 bulan disajikan dalam Gambar 2. Pada Gambar 2, garis meteorik lokal

mengadopsi garis meteorik lokal dari peneliti sebelumnya yaitu $\delta D = 8 \delta^{18}O + 14$ (7). Sedangkan garis waduk adalah garis hubungan antara kelimpahan relatif deuterium (δD) dan kelimpahan relatif oksigen-18 ($\delta^{18}O$) dari contoh air yang dikumpulkan dari waduk. Gambar 2 menunjukkan bahwa seluruh air keluaran yang terdapat di sekitar bendungan Wlingi merupakan

percampuran antara air tanah lokal dengan air waduk. Terlihat jelas bahwa air keluaran dengan kode contoh VS, OPR, OPL, dan RG (lihat Gambar 1) mempunyai indikasi kuat berasal air waduk. Kesimpulan ini diambil karena komposisi isotop stabil contoh air tersebut (deuterium dan oksigen-18) condong ke garis air waduk.



Gambar 2. Grafik hubungan antara kelimpahan relatif deuterium dan oksigen-18 untuk beberapa contoh di bendungan Wlingi



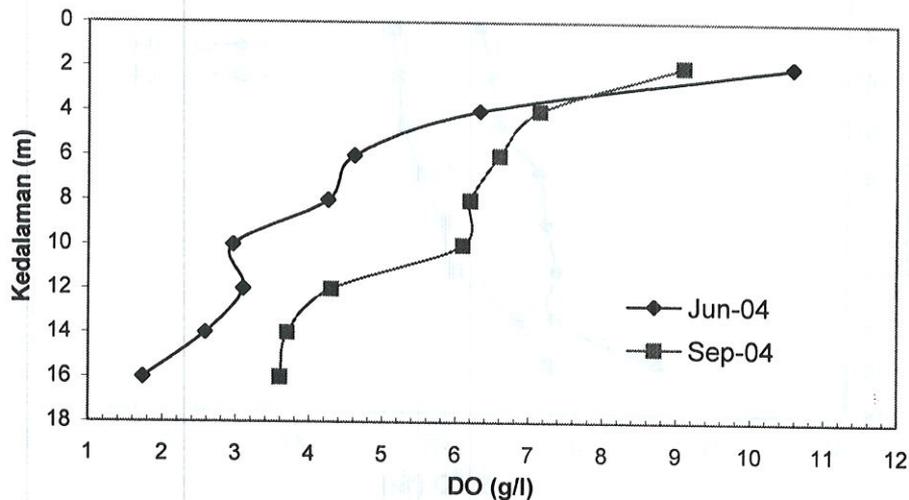
Gambar 3. Skema lokasi titik sampling air waduk

Penyelidikan Stratifikasi Air Waduk Jatiluhur

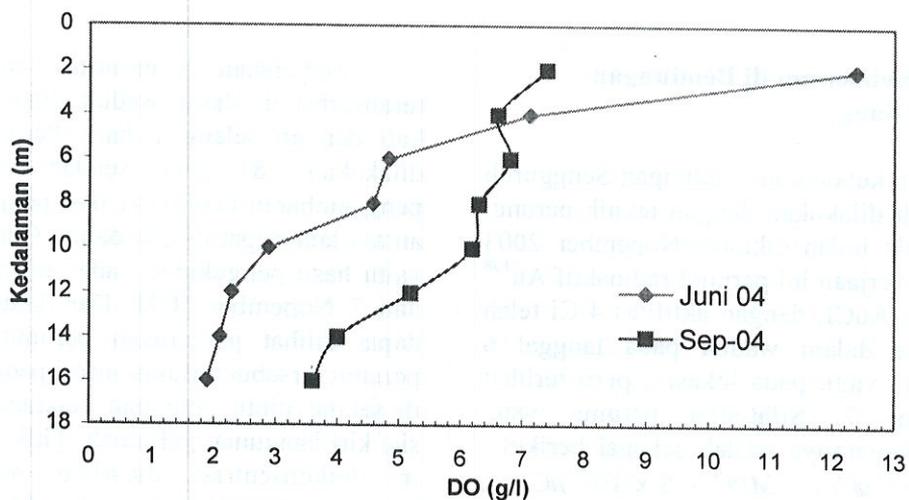
Penyelidikan pola stratifikasi air waduk adalah penting dilakukan sebagai bahan pertimbangan untuk mengelola air waduk termasuk untuk pengelolaan tumbuhan dan perikanan air waduk (9). Untuk tujuan ini, penyelidikan pola stratifikasi waduk Jatiluhur telah dilakukan dengan menggunakan teknik perunut isotop alam yang ditunjang dengan parameter *in situ* misalnya kadar oksigen terlarut air waduk (10,11). Penelitian ini dilakukan dengan pengambilan contoh air pada kedalaman yang berbeda pada dua periode yaitu bulan Juli 2004 dan September 2004 (10). Pengambilan contoh dilakukan pada dua lokasi seperti terlihat dalam Gambar 3. Untuk setiap contoh yang diambil, pengukuran parameter suhu dan oksigen terlarut dilakukan secara insitu sedangkan analisis

kelimpahan relatif oksigen-18 dari contoh dilakukan di laboratorium PATIR-BATAN Jakarta.

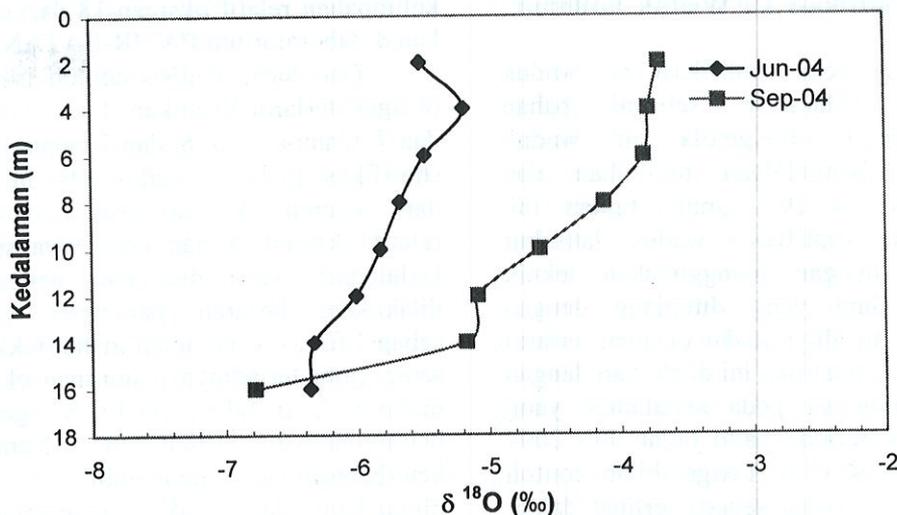
Dari hasil analisis contoh isotop alam dan oksigen terlarut disajikan dalam Gambar 4, 5, 6 dan 7. Gambar 4, 5, 6, dan 7 menunjukkan adanya stratifikasi pada air waduk. Hal ini dapat dilihat dari besaran oksigen terlarut dan kelimpahan relatif oksigen-18 dan variasinya sebagai fungsi kedalaman. Dari dua kali pengamatan yang dilakukan, besaran parameter yang diamati sebagai fungsi kedalaman menunjukkan pola yang sama yaitu terjadinya penurunan oksigen terlarut maupun kelimpahan relatif oksigen-18 dengan bertambahnya kedalaman. Namun karena keterbatasan alat pengambil contoh air yang digunakan dan waktu pengamatan, lapisan stratifikasi epilimnion, methalimnion, dan hypolimnion tidak dapat diidentifikasi secara jelas.



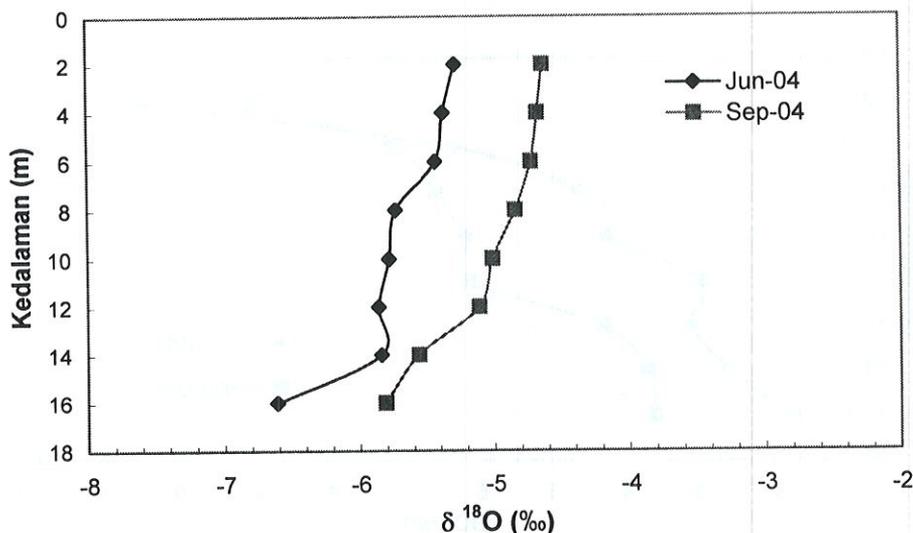
Gambar 4. Grafik stratifikasi oksigen terlarut waduk Jatiluhur AW-11



Gambar 5. Grafik stratifikasi oksigen terlarut waduk Jatiluhur AW-8



Gambar 6. Grafik stratifikasi oksigen-18 waduk Jatiluhur AW-8

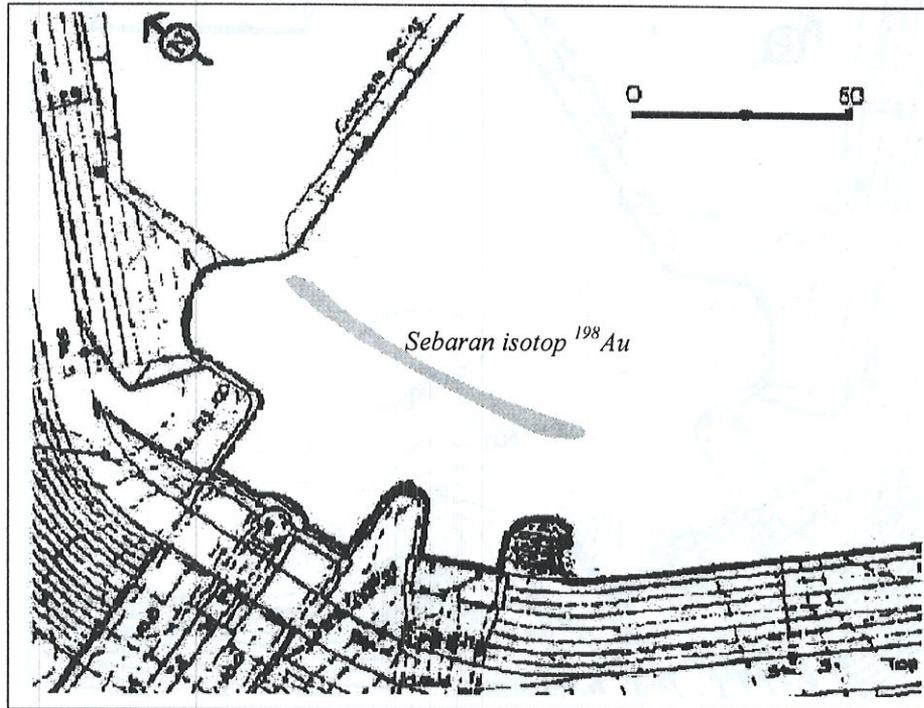


Gambar 7. Grafik stratifikasi oksigen-18 waduk Jatiluhur AW-11

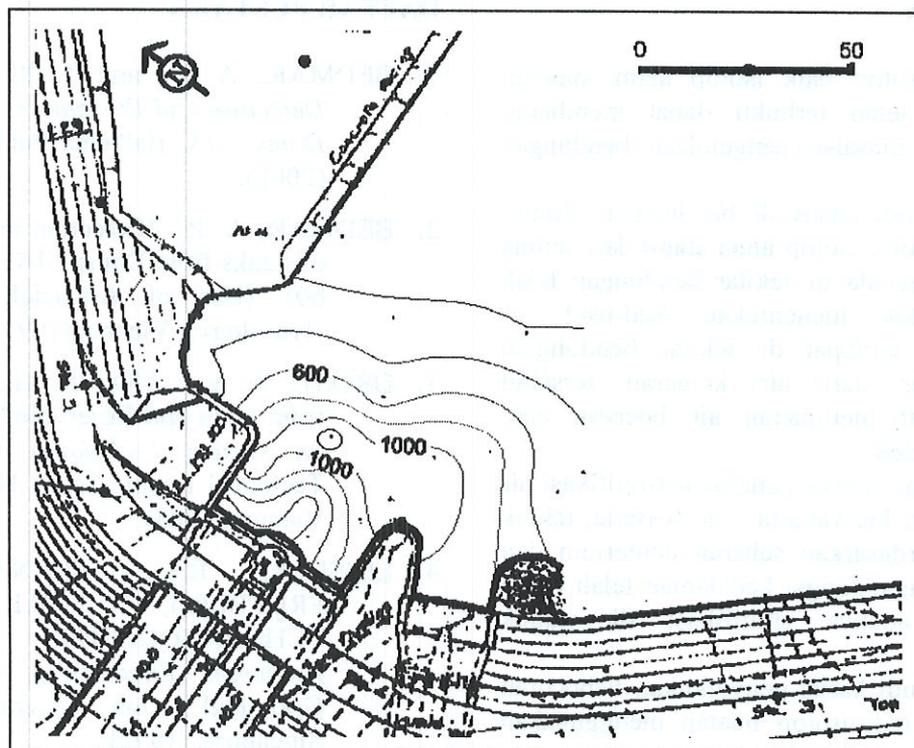
Penyelidikan Kebocoran di Bendungan Sengguruh, Malang

Penelitian kebocoran bendungan Sengguruh di Malang telah dilakukan dengan teknik perunut radioisotop pada bulan Oktober-Nopember 2003 (12). Dalam pekerjaan ini perunut radioaktif Au^{198} dalam senyawa $AuCl_3$ dengan aktifitas 4 Ci telah diinjeksikan ke dalam waduk pada tanggal 6 Nopember 2003 yaitu pada lokasi seperti terlihat dalam Gambar 7. Sifat-sifat perunut yang diinjeksikan diantaranya adalah sebagai berikut : $MDL = 1 \times 10^{-7} \mu Ci/cc$; $MPC = 5 \times 10^{-5} \mu Ci/cc$; energi γ yang dipancarkan = 0,41 MeV; dan volume air danau 1.000.000 m^3 .

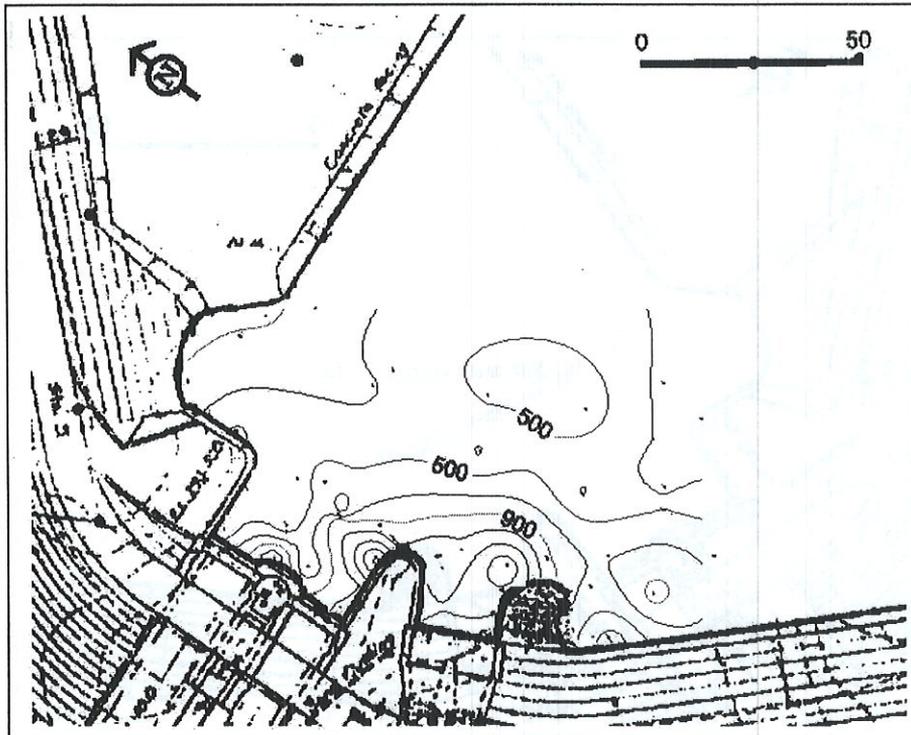
Penjejukan konsentrasi radioaktif yang terabsorpsi di dasar waduk dilakukan selama 5 kali dengan selang 1 hari. Penjejukan pertama dilakukan 8 jam setelah injeksi. Hasil penggambaran iso-kontur dari penjejukan tersebut antara lain dapat dilihat dalam Gambar 9 dan 10, yaitu hasil pengukuran pada tanggal 6 Nopember dan 7 Nopember 2003. Dari kedua Gambar ini dapat dilihat pergerakan perunut dan akhirnya perunut tersebut terkonsentrasi pada dua titik yaitu di sekitar pintu pelimpah bendungan dan sekitar sisi kiri bangunan pelimpah. Titik dimana perunut ini terkonsentrasi dicurigai merupakan titik bocoran yang selanjutnya perlu ditindaklanjuti.



Gambar 8. Lokasi pengkabutan isotop di bendungan



Gambar 9. Peta kontur isotop bendungan Sengguruh
Tgl. 6 Nopember 2003



Gambar 10. Peta kontur isotop bendungan Sengguruh
Tgl. 7 Nopember 2003

KESIMPULAN

Teknik isotop baik isotop alam maupun isotop buatan telah terbukti dapat membantu menanggulangi masalah pengelolaan bendungan dan waduk.

Dalam studi kasus di bendungan Wlingi, Jawa Timur, teknik isotop alam stabil dari semua sumber air yang ada di sekitar bendungan telah digunakan untuk menentukan asal-usul air keluaran yang terdapat di sekitar bendungan. Sebagian besar dari air keluaran tersebut berindikasi kuat merupakan air bocoran atau resapan dari waduk.

Dalam studi kasus penelitian stratifikasi air waduk Jatiluhur, Purwakarta - Jawa Barat, teknik isotop alam berdasarkan sebaran deuterium dan oksigen-18 sebagai fungsi kedalaman telah dapat menunjukkan adanya stratifikasi di waduk Jatiluhur.

Dalam studi kasus penyelidikan kebocoran dengan teknik radioisotop buatan menggunakan perunut Au^{198} pada bendungan Sengguruh, Malang - Jawa Timur, telah didemonstrasikan bahwa teknik ini dapat melokalisir tempat kebocoran pada dasar waduk.

DAFTAR PUSTAKA

1. BEDMAR, A. P. and LUIS ARAGUAS, *Detection and Prevention of Leaks from Dams*, A.A. Balkema Publishers, Lisse, (2002).
2. BEDMAR, A. P., "Detection and Prevention of Leaks from Dams", IAEA-TECDOC-601 (Use of Artificial Isotopes in Hydrology), Vienna, (1991).
3. DROST, W. and MOSER, H., "Leakage from lakes and Reservoirs", *Guide Book on Nuclear Techniques in Hydrology*, Technical Report Series No. 91, IAEA, Vienna, (1983).
4. LINSLEY, R.K., FRANZINI, J.B., FREYBERG, D.L., and TCHOBANOGLIOUS, G., *Water Resources Engineering 4th Ed.*, Mc Graw-Hill Inc. (International Ed.), Singapore, (1992).
5. HOEFS, J., *Stable isotop geochemistry*, Springer verlag, Berlin - Heidelberg - New York, (1980).

6. IAEA, "Stable Isotope Hydrology; Deuterium and Oxygen-18 in Water cycle", Technical report series No. 210, IAEA, Vienna, (1981).
7. DAGSTAN-BATAN, "Final Report: Study the origin of seepage/leakage water around Jatiluhur, Wlingi, and Ngancar Dams." Jakarta, (1999).
8. SIDAURUK, P., "Pengaruh proses penguapan terhadap perbandingan D/H dan $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dalam air", *Skripsi sarjana*, Fakultas MIPA - UNAS, Jakarta, (1987).
9. HART, T. H., WENDY VAN DOK, dan NANI DJUANGSIH, "Nutrient Budget For Saguling Reservoir, West Java, Indonesia." *Water Resrearch*, 36, 2152-2160 (2002).
10. P3TIR BATAN-PJT II, "Laporan Akhir: Penelitian Monitoring Sumber Air yang Berada di Sekitar Waduk Jatiluhur Dengan Teknik Isotop Alam dan Hidrokimia, tahap-III", Jakarta, (2004).
11. P3TIR BATAN-PJT II, "Laporan Akhir: Penelitian Monitoring Sumber Air yang Berada di Sekitar Waduk Jatiluhur", Jakarta, (2003).
12. P3TIR BATAN-PJT I, "Laporan Akhir: Penelitian Identifikasi Bocoran Dengan Teknik Perunut Radiosotop di Bendungan Sengguruh-Malang", Jakarta, (2004).

DISKUSI

YONO (AL-ZAYTUN INDRAMAYU)

1. Jarak (batas) bahwa air rembesan dari air waduk bukan dari air tanah ?
2. Mengapa menggunakan radioisotop Au? Tidak diambil isotop gamma yang melimpah dan murah ?
3. Berapa kedalaman mengambil sampling air rembesen ?

PASTON SIDAURUK (BATAN)

1. Pada umumnya sampel diambil dari semua air keluaran yang ada di sekitar bendungan yang kemudian diselidiki asal usulnya.
2. Au mempunyai sifat mudah terabsorpsi oleh partikel-partikel yang dilaluinya sehingga dapat dijejak lintasannya sampai titik bocoran.

NGUYEN QUOC HIEN (VIETNAM)

What is the name of ^{198}Au using in your experiment is it a component or linking of Au^{+++} ?

PASTON SIDAURUK (BATAN)

Chloro-auric acid ($\text{HAuClO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$).

M. NURCHLOIS (UPN, YOGYAKARTA)

Bagaimana cara mendeteksi cemaran air tanah yang bersumber dari pencemaran industri, bergerak dengan menggunakan isotop ?

PASTON SIDAURUK (BATAN)

Boleh menggunakan perunut yang ada di dalam air itu sendiri.

KALLISTA (IPB)

Pada penggunaan isotop, apakah setelah pengambilan sampel selesai masih ada residu isotop di waduk? Apakah hal tersebut berbahaya, apabila digunakan misalnya: untuk irigasi dan *supply* air rumah tangga ?

PASTON SIDAURUK (BATAN)

Ya ada, tapi dalam konsentrasi aman < MPC. Disitu juga keuntungan dari teknik isotop, yaitu peluruhan akan membuat dalam 5 s/d 6 kali umur paro konsentrasinya dapat diabaikan.

