

## MODEL SEBARAN RESIDU RADIONUKLIDA KE DALAM AIR SUNGAI DI LINGKUNGAN PERTAMBANGAN ZIRKON

**M. Yazid, Wijiyono, Aris Bastianudin**

*Pusat Sains dan Teknologi Akselerator – BATAN*

*Jl. Babarsari No. 21 Kotak Pos 6101 ykbb Yogyakarta 55281*

*yazid@batan.go.id*

**Muhtadan**

*Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir – Badan Tenaga Nuklir Nasional*

*Jl. Babarsari No. 21 Yogyakarta 55281*

### ABSTRAK

**MODEL SEBARAN RESIDU RADIONUKLIDA KE DALAM AIR SUNGAI DI LINGKUNGAN PERTAMBANGAN ZIRKON.** Telah dipelajari model sebaran residu radionuklida ke dalam air sungai di lingkungan pertambangan zirkon. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari model sebaran dan melakukan perhitungan radioaktivitas yang terlepas dari kegiatan pertambangan zirkon dan terbawa aliran air sungai, yang diharapkan dapat digunakan untuk pembuatan rekomendasi pengelolaan residu tersebut. Residu pertambangan zirkon mengandung bahan radioaktif dari deret uranium, thorium dan K-40, sehingga tingkat radioaktivitasnya akan lebih tinggi dibandingkan dengan alam di sekitarnya. Ditentukan formula matematis dengan penyelesaian secara numerik menggunakan aplikasi komputer dengan bahasa pemrograman Matlab 6.1 hingga diperoleh simulasi grafik tiga dimensi. Di samping itu, dilakukan perhitungan tingkat radioaktivitas di sepanjang aliran air sungai dengan variasi jarak 10, 25 dan 100 meter. Kesimpulan dari penelitian ini antara lain diperoleh gambaran model sebaran radionuklida ke dalam air sungai di lingkungan pertambangan zirkon dengan menggunakan aplikasi komputer yang telah dibuat. Dari hasil perhitungan aktivitas radionuklida di dalam air sungai dengan kedalaman 0,5 meter, kecepatan alir 0,6 meter/detik, jarak aliran 10 - 100 meter dengan aktivitas pelepasan 1 Bq/liter berkisar antara 0,05817 - 0,07500 Bq /liter. Untuk menekan resiko lingkungan maka perlu dilakukan pengolahan air buangan sebelum dilepas ke lingkungan.

**Kata Kunci :** sebaran radionuklida, aplikasi komputer, pertambangan zirkon

### ABSTRACT

**MODEL OF RADIONUCLIDE RESIDU DISTRIBUTION INTO THE RIVER WATER AROUND ZIRCONIUM MINING.** The model of radionuclide residual pattern to the water river in the environmental of zirconium mining had been studied. The objectives of this research is to studied of the pattern model and calculated the level of radioactivity had been release to the river stream from the zirconium mining activities, had expected can be used for made of that residual management recommendation. The common of zirconium mining residue were contained of the radionuclide materials such as K-40, uranium and thorium series so that level of radioactivities is more height than their environment. The mathematical formula had been determined used the numerical solution developed the computer application by using Matlab 6.1 and the simulation results is three dimation graphic. Beside that, the calculation of the radioactivity level a long of the river downstream with distance variation 10, 25 and 100 meter had been done. The conclusion of this research i e : the image of radionuclide pattern model to the river water in theenvironmental of the zirconium mining can be resulted by using computer application had been developed. The calculation results of the radioactivity in the river stream with 0.5 meters depth and 0.6 meters flow rate with the variation distance 10 – 100 meters for release activity 1 Bq/liters, the radioactivity in the range 0.05817 to 0.07500 Bq /liter. The residual radioactivities must be treatment before released to minimalized of the environmental risk.

**Keywords :** radionuclide pattern, computer application, zirconium mining

### PENDAHULUAN

Pengelolaan pertambangan mineral dan batubara di Indonesia yang didasarkan pada Undang-Undang Nomor 4 tahun 2009, di dalamnya mengatur pula pembinaan dan pengawasan keselamatan lingkungan pertambangan yang meliputi kegiatan konservasi dan reklamasi lahan pasca tambang. Kegiatan pertambangan selalu memiliki resiko

lingkungan yang berupa kerusakan atau menurunnya kualitas lingkungan tersebut sehingga menjadi tidak lestari lagi. Namun demikian, kegiatan pertambangan harus tetap berjalan untuk pencapaian pertumbuhan dan kesejahteraan manusia. Optimalisasi untuk mengurangi resiko dan kerugian lingkungan dilakukan dengan analisis dampak lingkungan (AMDAL) terhadap kegiatan yang kemungkinan

menimbulkan dampak besar dan penting terhadap lingkungan tersebut<sup>(1)</sup>.

AMDAL merupakan kajian dampak terhadap suatu lingkungan tertentu yang mulai dibuat pada tahap perencanaan dan digunakan untuk pertimbangan di dalam pengambilan keputusan. Hal-hal yang dikaji dalam proses ini, antara lain : aspek fisik-kimia, ekologi, sosial-ekonomi, sosial-budaya, dan kesehatan masyarakat sebagai pelengkap studi kelayakan suatu rencana usaha dan/atau kegiatan tersebut.

Kegiatan penambangan terbuka, akan memberikan dampak secara langsung terhadap kerusakan lahan dan menurunnya kuantitas serta deversitas biota yang berada dalam ekosistem tersebut. Selain itu, mengakibatkan berbagai perubahan yang signifikan di sekitar lokasi tambang, seperti hilangnya vegetasi penutup, perubahan topografi dan pola hidrologi serta kerusakan permukaan tanah. Dampak yang ditimbulkan oleh proses penambangan tidak hanya terjadi di lokasi tambang tetapi juga lingkungan di sekitarnya.

Bentuk pemulihan suatu ekosistem dengan reklamasi ialah dilakukan pada kondisi habitat yang terganggu termasuk tutupan vegetasi beserta peranan fungsi jasa ekologisnya. Tindakan ini diawali dengan cara melakukan identifikasi terhadap kendala-kendala utamanya (tanah, air dan hara mineral) guna menentukan jenis introduksi yang akan dikembangkan. Begitu juga untuk lingkungan pertambangan zirkonium.

Zirkonium sebagian besar terdapat dalam mineral baddeleyit dan pasir zirkon, kemungkinan juga terdapat dalam tanah jarang (*rare earth*), monazit, senotim, dan ilmenit dengan kadar yang tidak begitu besar. Beberapa mineral yang terdapat zirkonium tersebut umumnya mengandung *naturally occurring radioactive materials (NORM)* yaitu bahan radioaktif yang terkandung di dalam mineral alam. *NORM* tersebut antara lain seperti U-238 dan anak luruhnya, Th-232 dan anak luruhnya, serta K-40.

Pasir zirkon yang dihasilkan oleh *Iluka Resources* mengandung *TENORM* dengan aktivitas antara 0,6 sampai 1,2 Bq/g (thorium-232) dan 1,5 sampai 4,5 Bq/g (uranium-238). Anak-anak luruh produk biasanya terdapat dalam konsentrasi konsentrasi yang stabil<sup>(2)</sup>. Kandungan *TENORM* yang terdapat dalam pasir zirkon lebih tinggi dibandingkan dengan batuan fosfat, aluminium, dan tembaga<sup>(3)</sup>.

Radionuklida yang berupa uranium dan thorium yang didapatkan dari setiap penambangan pasir zirkon merupakan obyek pengawasan BAPETEN dan IAEA. Pengawasan tersebut dalam rangka memenuhi perjanjian *safeguards* yang diatur dengan UU No. 8 tahun 1978 tentang —Traktat Pembatasan Senjata Nuklir dan secara khusus diatur dalam Peraturan Kepala BAPETEN No. 09 tahun 2009 tentang Intervensi terhadap Paparan yang

Berasal dari *Technologically Enhanced Naturally Occuring Radioactive Material (TENORM)*.

Berkenaan dengan itu, diperlukan fasilitas pengelolaan air limbah yang mengandung *TENORM* (U-238 dan Th-232) yang ditimbulkan oleh pengolahan pasir zirkon menjadi produk zirkonium dalam rangka mencegah dan meminimalisasi dampak negatif selama dan pasca pabrik zirkon beroperasi. Selain itu, dibutuhkan juga pemantauan lingkungan di sekitar area tersebut untuk melindungi lingkungan dari dampak negatif yang ditimbulkan<sup>(4)</sup>. Agar pemantauan lingkungan yang dilakukan dapat efektif dan efisien maka sebelumnya dilakukan pemodelan distribusi radionuklida di lingkungan tersebut.

Model distribusi radionuklida di lingkungan pada prinsipnya diawali dari pelepasan radionuklida dari *source term* melalui *critical pathways* dan akhirnya menuju ke berbagai komponen ekosistem sebagai *receptor*-nya<sup>(5)</sup>. Pada penelitian ini terlebih dahulu akan dilakukan pembahasan terhadap transport radionuklida ke air permukaan. Di lingkungan kejadian, transfer radionuklida sangatlah kompleks, maka dibuat penyederhanaan dengan pendekatan model matematis dengan mengasumsikan beberapa parameter yang menentukan, selanjutnya dibuat aplikasi komputer untuk mempermudah pelaksanaan perhitungannya.

Dalam penelitian ini digunakan persamaan analitis (1) dengan dasar pertimbangan formulanya relatif sederhana sehingga mudah cara penyelesaiannya, tetapi sudah memenuhi kebutuhan untuk pemodelan distribusi radionuklida ke dalam air sungai.<sup>(6)</sup>

$$u d \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} (E_y d \frac{\partial C}{\partial y}) - (\lambda d) C \quad (1)$$

Kondisi :

$$\frac{\partial C}{\partial y} = 0 \text{ pada } y = 0 \text{ dan } y = B \quad (2)$$

Keterangan :

$C$  = Konsentrasi Radionuklida

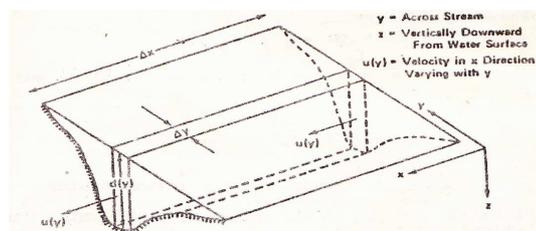
$D$  = Kedalaman Aliran

$E_y$  = Koef. Dispersi lateral turbulen

$u$  = Kecepatan aliran

$\lambda$  = Tetapan Peluruhan

Adapun model aliran sungai yang dipakai dalam pembuatan aplikasi komputer ini, disajikan pada Gambar 1.



**Gambar 1. Model aliran kecil dalam tabung pada aliran alami.**

## TATA KERJA

Untuk membuat suatu model aplikasi komputer, yang sesuai dengan persoalan yang ingin diselesaikan, diperlukan model matematika yang dipilih seperti yang telah disusun di dalam pendahuluan. Dalam hal ini model matematika yang digunakan sebagai bahan pembuatan aplikasi adalah persamaan (1) dan (2). Selanjutnya diperlukan perangkat keras dan perangkat lunak, guna pembuatan aplikasi antara lain : Komputer dengan spesifikasi : Intel(R) Pentium(M) 1500MHz, Memori 512 MB dan Hard disk dengan kapasitas 80GB. Perangkat lunak : Microsoft Windows XP dan bahasa pemrograman Matlab 6.1.

Dalam pembuatan perangkat lunak untuk aplikasi komputer ini dilakukan dengan tahapan sebagai berikut <sup>(7)</sup> :

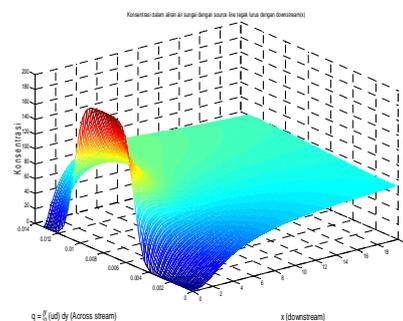
1. Analisis dan rekayasa sistem : Pada tahapan ini yang dilakukan meliputi aspek-aspek yang berkaitan dengan perencanaan dan pengendalian masalah, yaitu dengan adanya persoalan perhitungan konsentrasi radionuklida pada air sungai.
2. Analisis persyaratan : Agar aplikasi komputer mudah digunakan, maka dalam penelitian ini digunakan perangkat lunak Matlab 6.1. Sebagai perangkat lunak yang mendukung pemrograman berorientasi obyek. Matlab 6.1 juga menyediakan kemampuan numerik yang handal dan penyediaan fasilitas grafik yang memadai.
3. Perancangan : Untuk membuat aplikasi komputer ini, sebelum dibangun program dibuat dulu perancangan antar muka. Dalam perancangan ini dibuat pula analisis kebutuhan, yaitu kebutuhan input, proses sebagai rancangan program dan output. Dalam kebutuhan proses tersebut algoritma pemrogramannya adalah sebagai berikut, berdasarkan algoritma perhitungan konsentrasi sebagai kebutuhan proses ditampilkan pada tahapan perancangan ini.
4. Penulisan program ; Menterjemahkan rancangan antar muka dan rancangan program kedalam bahasa pemrograman Matlab 6.1.
5. Pengujian : Setelah dibangun program, hasil outputnya diuji dengan penyelesaian secara manual untuk kasus yang sederhana serta dianalisis dengan kondisi yang nyata, misalkan untuk menghitung aktivitas air sungai dengan variasi jarak aliran 10, 50 dan 100 meter dengan radioaktivitas pelepasan pada outlet bervariasi 1, 10 dan 25 Bq/liter
6. Dibuat rekomendasi untuk dasar pengelolaan residu pertambangan zirkon.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini aplikasi komputer yang dibuat hanya berlaku untuk perhitungan radionuklida tunggal saja, walaupun dalam kenyataannya di dalam residu pertambangan pada umumnya mengandung beberapa jenis radionuklida antara lain : U-238, Th-232, Ra-226, Th-238, Pb-210 dan K-40 <sup>(8)</sup>. Hal ini disebabkan untuk penyederhanaan model matematik yang dipakai. Berkenaan dengan itu, maka perhitungan dilakukan secara bergantian.

Beberapa parameter perhitungan dibuat bervariasi antara lain : harga C (konsentrasi radionuklida) U-238 sebesar 10 Bq/L sesuai dengan *clearance level* Perka BAPETEN No.16 Tahun 2012, D (kedalaman aliran) = 0,1 – 0,5 meter berdasarkan hasil survey, Ey (koef. dispersi lateral turbulen dengan satuan : gram / meter /detik, konsentrasinya lebih rendah dari *clearance level* dan kecepatan dispersinya lebih rendah dari kecepatan alir, u (Kecepatan aliran) berdasarkan hasil survey = 0,4 – 0,6 meter/detik dan  $\lambda$  (tetapan peluruhan) =  $0,693/ t_{1/2}$  (tergantung jenis radionuklida yang dihitung).

Pada aplikasi komputer yang dibuat diperoleh 2 tampilan grafik tiga dimensi dengan outlet berbentuk garis dan titik. Jika diisi dengan input-input konsentrasi radionuklida yang terlepas sebesar 1 Bq/L, kedalaman aliran 0,5 meter, kecepatan aliran 0,6 meter/detik dan  $\lambda = 0,693/ t_{1/2}$  (Uranium-238 = 4.5 billion tahun), maka akan diperoleh model sebaran seperti Gambar 2.

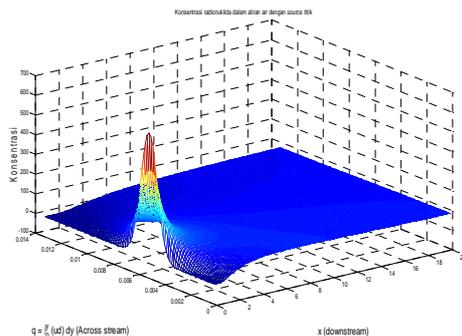


**Gambar 2. Model Sebaran U-238 dengan Sumber Outlet Berbentuk Garis**

Dari Gambar 2 terlihat bahwa konsentrasi maksimal berada di dalam garis outlet yang berupa garis pada jarak 0 meter dari lokasi dimana residu radionuklida dari area pertambangan zirkon dilepaskan ke lingkungan. Untuk selanjutnya radionuklida akan terbawa oleh aliran air sungai menuju ke arah hilir yang dalam Gambar 3 konsentrasinya terlihat relatif stabil. Hal ini disebabkan karena umur paro radionuklida U-238

yang terkandung di dalam residu tersebut sangat panjang sehingga dengan kecepatan aliran air sungai 0,6 meter/detik dalam waktu singkat radionuklida sudah tersebar dalam jarak yang relatif jauh. Hal ini akan berlainan jika residu radionuklida terbawa ke dalam badan air yang lebih tenang seperti danau ataupun kolam, atau sebaliknya jika umur paro radionuklida yang terbawa aliran air sungai relatif pendek.

Hal yang sama akan terjadi jika outlet residu radionuklida yang dilepas ke lingkungan dibuat berbentuk titik seperti disajikan dalam Gambar 3.



**Gambar 3. Model Sebaran Radionuklida U-238 dengan Outlet Berbentuk Titik**

Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa konsentrasi radionuklida tertinggi terdapat pada titik outlet dimana radionuklida tersebut dilepaskan ke lingkungan dan selanjutnya menyebar sesuai dengan arah aliran sungai. Sedangkan jika diamati dari bentuk outletnya, ternyata tidak ada perbedaan yang signifikan diantara keduanya, mungkin akan berbeda apabila radionuklida yang tersebar ke dalam aliran sungai tersebut berumur pendek, misalnya I-131 yang biasa dipakai dalam kegiatan pemeriksaan kedokteran nuklir.

Adapun hasil simulasi perhitungan radionuklida dengan variasi koordinat titik pengukuran dan aktivitas *source term* yang berbentuk titik dan garis disajikan di dalam Tabel 1 dan 2 di bawah ini.

**Tabel 1. Hasil Perhitungan Konsentrasi Radionuklida dengan Variasi Koordinat dan Aktivitas Source Term Berbentuk Titik.**

Aktivitas Source Term (Bq/L)	Jarak Aliran Sungai (meter)		
	10	50	100
1	0,05817	0,07481	0,07499
10	0,58172	0,74814	0,74899
25	1,4543	1,87035	1,87498

Dari Tabel 1 dapat diketahui bahwa dengan aktivitas radionuklida yang terlepas dari outlet (*source term*) berkisar antara 1 – 25 Bq/ liter, kecepatan aliran air

sungai 0,6 meter/detik, kedalaman aliran 0,5 meter ternyata pola sebaran konsentrasi radionuklida terhadap jarak aliran air sungai dari 10 sampai dengan 100 meter sangat linier. Hal ini disebabkan karena semua kondisi lingkungan masih dianggap ideal, misalnya kedalaman aliran sepanjang 100 meter dianggap sama, kecepatan alir dianggap seragam tanpa halangan tumbuhan maupun bebatuan, walaupun kenyataan dilapangan tidaklah demikian. Akan tetapi perlu diingat bahwa tujuan pembuatan aplikasi komputer ini hanyalah untuk pemodelan sebaran residu radionuklida, namun untuk keperluan keselamatan masyarakat dan lingkungannya mutlak masih diperlukan konfirmasi pengukuran secara langsung di lapangan.

**Tabel 2. Hasil Perhitungan Konsentrasi U-238 dengan Variasi Jarak Aliran dan Aktivitas Source Term Berbentuk Garis.**

Aktivitas Source Term (Bq/L)	Jarak Aliran Sungai (meter)		
	10	50	100
1	0,08826	0,07517	0,07500
10	0,88263	0,75173	0,75000
25	2,20658	1,87934	1,87501

Hasil perhitungan konsentrasi U-238 dengan variasi jarak aliran dan aktivitas *source term* dari outlet yang berbentuk garis disajikan pada Tabel 2. Jika dibandingkan dengan pola sebaran radionuklida dari *source term* yang berbentuk garis ternyata hampir sama, berarti pengaruh bentuk *source term* sejauh ini tidak berpengaruh terhadap pola sebaran radionuklida U-238 di dalam air sungai, selama parameter lainnya seperti kecepatan dan kedalaman alirannya sama.

Dengan melakukan analisis pola sebaran radionuklida U-238 ke dalam air sungai tersebut dapat disimpulkan bahwa dalam pelepasan residu radionuklida dari area pertambangan zirkon yang harus dikendalikan adalah aktivitas radionuklida pada titik outlet, karena jarak aliran air sungai tidak berpengaruh terhadap aktivitasnya sehingga resiko lingkungannya masih tetap tinggi. Hal itu disebabkan karena residu radionuklida dari area pertambangan zirkon pada umumnya mempunyai umur paro yang panjang, antara lain : U-235 ( $7,04 \times 10^8$  tahun), U-238 ( $4,47 \times 10^9$  tahun), Th-232 ( $1,41 \times 10^{10}$  tahun), Ra-226 ( $1,60 \times 10^3$  tahun) dan K-40 ( $1,28 \times 10^9$  tahun).<sup>(8)</sup>

Pengendalian radioaktivitas sebelum dilepas ke lingkungan dapat dilakukan dengan cara ditampung terlebih dahulu ke dalam kolam penampungan dengan prinsip endap dan tunda serta melakukan pengaturan debit lepasan di titik outlet sehingga aktivitasnya dapat terawasi dengan baik. Selain itu, dapat pula dilakukan dengan metode

bioremediasi memanfaatkan agen bioremediator tumbuhan ataupun mikroorganisme yang sesuai untuk mengendalikan tingkat radioaktivitasnya sebelum dilakukan pelepasan ke lingkungan.

## KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa dapat diperoleh gambaran model sebaran radionuklida ke dalam air sungai di lingkungan pertambangan zirkon dengan menggunakan aplikasi komputer yang telah dibuat. Dari perhitungan aktivitas radionuklida yang tersebar ke dalam air dengan kedalaman 0,5 meter, kecepatan alir 0,6 meter/detik, jarak aliran 10 - 100 meter dengan aktivitas awal 1 Bq/liter berkisar antara 0,05817 - 0,07500 Bq /liter. Untuk menekan resiko lingkungan maka perlu dilakukan pengelolaan air buangan sebelum dilepas ke lingkungan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Bapedal., " Aspek Lingkungan dalam AMDAL Bidang Pertambangan", Pusat Pengembangan dan Penerapan AMDAL" , BAPEDAL, Jakarta (2001).
2. Iluka., " Material Safety Data Sheet Zircon Sand Product  
",<http://www.iluka.com/uploads/documents/Datasheets/Iluka%20Zircon%20MSDS%20December%2008%20Aust.pdf>. Desember (2008),
3. Chalmers, D.I., "An Example of the Process Required to Take a Next Generation Polymetallic Rare Metal and Rare Earth Deposit into Production, Rare Earths and Strategic Metals"., Sydney, Alkane Resources Ltd, Dubbo Zirconia Project NSW Australia, <http://www.alkane.com.au/presentations/pdf/20110621.pdf>. , 21-22 June (2011)
4. Hery Purnomo., "Informasi Umum Zirkonium" [pkpp.ristek.go.id/-assets/upload/docs/77-doc-3.pdf](http://pkpp.ristek.go.id/-assets/upload/docs/77-doc-3.pdf). diakses 26 Maret 2014
5. WHICKER, F.W & V. SCHLUTZ., "Radioecology : Nuclear Energy and Environment" CRC Press Inc, USA (1982)
6. CIRC., " Transport Models of Radionuclidea in Surface Water. " Reg. TC Env. Mon and Dose Assessment, China (1991)
7. Supriyono., "Aplikasi Komputer untuk Visualisasi Pola Sebaran Konsentrasi Gas dari Sumber Titik Instan dalam Fluida Diam dan Medium Anisotrop." Seminar Nasional V SDM Teknologi Nuklir Yogyakarta , ISSN 1978-0176, 5 November (2009).

8. [www.batan.go.id/pusdiklat/e-learning/proteksi\\_radiasi/pengenalan\\_radiasi/3.htm](http://www.batan.go.id/pusdiklat/e-learning/proteksi_radiasi/pengenalan_radiasi/3.htm). diakses 26 Maret 2014.

## TANYA JAWAB

### Gede Sutresna W

- Dispersi dalam air permukaan sangat dipengaruhi oleh turbulensi di badan air, kedepan supaya dimasukkan pengaruh turbulensi ke dalam persamaan dispersinya.

### Wijiyono

- *Memang banyak parameter lingkungan yang berpengaruh pada dispersi radionuklida ke dalam air permukaan tetapi dalam pembuatan suatu model tentu saja tergantung pada rumus yang dipilih.*

### Gunadjar

- Mohon dijelaskan berdasar data simulasi yang diberikan khususnya untuk parameter konsentrasi aktivitas radionuklida awal bagaimana penyebarannya dengan aliran sungai?
- Mohon dijelaskan hasil penyebaran radionuklida terhadap pengaruh parameter kecepatan alir air sungai, karena kecepatan alir air sungai juga bervariasi tergantung musim kemarau atau musim penghujan.

### Wijiyono

- *Pola penyebarannya seperti terlihat pada grafik yang digambarkan outletnya berbentuk garis dan titik yang tentu saja semakin menurun sejalan dengan jarak aliran sungai.*
- *Pada pembuatan model ini kecepatan alir diasumsikan konstan, tapi dalam aplikasi computer yang dibuat dapat dibuat variasi sesuai kondisi lapangan.*

### Isman Mulyadi Triatmoko

- Mohon ditambahkan nama aplikasi yang digunakan pada kesimpulan.

### Wijiyono

- *Saran dipertimbangkan.*