

## MODEL SEBARAN RADIONUKLIDA ANTROPOGENIK DI LAUT

**Chevy Cahyana**

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN,  
Kawasan PUSPIPTEK, Serpong-Tangerang 15310

### ABSTRAK

MODEL SEBARAN RADIONUKLIDA ANTROPOGENIK DI LAUT. Pemanfaatan energi nuklir sebagai sumber energi baru harus memprioritaskan perlindungan dan pelestarian fungsi lingkungan hidup. Pengkajian perilaku radionuklida antropogenik di laut dapat dilakukan untuk memprediksi pola sebaran efluen radioaktif yang terlepas ke laut, sebagai dampak dari pengoperasian PLTN. Model hidrodinamika laut dapat digunakan untuk mengkaji perilaku radionuklida antropogenik di laut. Dalam penelitian ini telah dilakukan pemodelan sebaran efluen radioaktif secara analitik dengan model generik, dan secara numerik dengan metode elemen hingga. Hasil pemodelan dengan metode numerik lebih fleksibel dan dapat dengan mudah diaplikasikan untuk kondisi yang sebenarnya di semenanjung Muria, Jepara dan perairan selat Bangka sebagai calon tapak PLTN.

**Kata kunci:** radionuklida, antropogenik, model

### ABSTRACT

*THE MODEL OF ANTHROPOGENIC RADIONUCLIDE DISPERSION IN THE SEA. The use of nuclear energy as new energy must prioritize the protection and conservation the function of environment. The assessment of anthropogenic radionuclide behavior in the ocean can be done to predict dispersion pattern of radioactive effluent released to the ocean, as an impact of the operation of NPP. Ocean hydrodynamic model can be used to assess the behavior of anthropogenic radionuclide in the ocean. On this research, the modeling of radioactive effluent dispersion has been done analytically using generic model and numerically by finite element methods. The numerical method modeling result has better flexibility and easily applied for site specific condition at Muria peninsula, Jepara and Bangka strait as the candidate of NPP's sites.*

**Keywords:** radionuclide, anthropogenic, model

### PENDAHULUAN

Peraturan Presiden nomor 5 tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) memberi arahan agar upaya pemakaian energi baru dan terbarukan ditingkatkan. Energi baru adalah bentuk energi yang dihasilkan oleh teknologi baru baik yang berasal dari energi terbarukan maupun energi tak terbarukan. Energi terbarukan adalah sumber energi yang dihasilkan dari sumberdaya energi yang secara alamiah tidak akan habis dan dapat berkelanjutan jika dikelola dengan baik.

Salah satu sasaran dari Kebijakan Energi Nasional adalah pemanfaatan energi nuklir yang merupakan salah satu bentuk energi baru. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia nomor 43 tahun 2006 tentang Perizinan Reaktor Nuklir tanggal 15 Desember 2006 merupakan momentum awal kebijakan pemerintah Indonesia mengenai pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Dewan Energi Nasional merumuskan bahwa salah satu permasalahan energi yang dihadapi dan perlu diselesaikan saat ini adalah perlindungan dan pelestarian fungsi lingkungan hidup belum menjadi prioritas. Oleh karena itu rencana pembangunan PLTN sebagai upaya pemanfaatan energi baru harus disertai dengan pengkajian dampak pengoperasian PLTN terhadap lingkungan.

Pengoperasian PLTN dapat menyebabkan terlepasnya efluen radioaktif ke laut, baik secara langsung berupa efluen cair maupun secara tidak langsung melalui deposisi efluen radioaktif yang terlepas ke udara. Penggunaan air laut sebagai pendingin (*cooling water*) dapat menyebabkan terlepasnya efluen sekunder berupa panas. Pola sebaran efluen radioaktif maupun efluen panas

sangat dipengaruhi oleh pola gerak air laut. Pola gerak air laut dapat dikaji dengan model hidrodinamika laut. Hidrodinamika adalah ilmu yang mempelajari gerak fluida, khususnya zat cair *non compressible* yang dipengaruhi oleh gaya internal dan eksternal. Hidrodinamika merupakan cabang dari mekanika fluida yang terdiri dari konsep momentum, kontinuitas, tekanan, viskositas, waktu, turbulensi, dan gesekan [1, 2].

Mengacu pada Agenda Riset Nasional 2010-2014 yang menyatakan bahwa perlindungan dan pelestarian lingkungan hidup harus menjadi prioritas dalam pemanfaatan energi baru dan terbarukan, maka dalam penelitian ini dilakukan pengkajian perilaku radionuklida antropogenik di laut untuk memprediksi pola sebaran efluen radioaktif yang terlepas ke laut, sebagai bagian dari analisis dampak lingkungan pengoperasian PLTN.

## TEORI

### Sifat Radionuklida Antropogenik di Laut

Pada saat terlepas ke laut, radionuklida antropogenik dibagi ke dalam dua kelompok, yaitu radionuklida konservatif dan radionuklida non konservatif (*particle reactive*). Radionuklida konservatif didefinisikan sebagai radionuklida yang sangat mudah larut dalam air laut, sehingga penyebarannya dalam laut sangat dipengaruhi oleh proses fisika berupa pencampuran dan difusi. Yang termasuk radionuklida konservatif diantaranya adalah Cs-137, Sr-90, C-14 dan I-129. Radionuklida yang bersifat partikel reaktif lebih mudah menghilang dari laut disebabkan oleh afinitasnya terhadap permukaan partikel alam yang menyebabkan radionuklida ini tenggelam ke dasar laut dan masuk ke dalam sedimen. Contoh radionuklida partikel reaktif adalah Pu-239, Pu-240, Ru-106 dan Ce-144 [3].

### Model Pergerakan Radionuklida di Laut

Pergerakan radionuklida di laut dapat dimodelkan secara matematika berdasarkan pada persamaan adveksi difusi dua dimensi yang dirata-ratakan secara vertikal sebagai berikut [4],

$$U \frac{\partial C_{w,tot}}{\partial x} = \varepsilon_y \frac{\partial^2 C_{w,tot}}{\partial y^2} - \lambda_i C_{w,tot} \quad (1)$$

dimana  $U$  adalah arus laut. Persamaan tersebut merepresentasikan adveksi longitudinal, dispersi konsentrasi lateral dan peluruhan radionuklida yang berubah terhadap waktu.  $\varepsilon_y$  adalah koefisien dispersi lateral yang merupakan fungsi dari  $x$  dan  $U$  seperti yang ditunjukkan dalam persamaan (2).

$$\varepsilon_y = (3.44 \times 10^{-7}) \left( \frac{x}{U} \right)^{1.34} \quad (2)$$

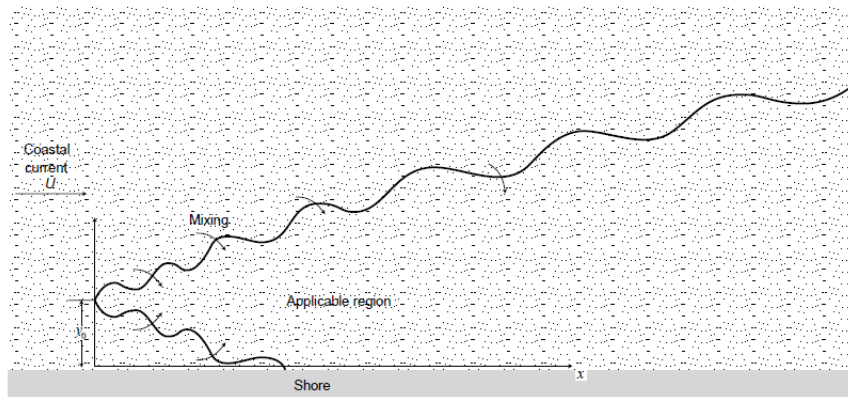
Untuk memperoleh solusi analitik dari persamaan diferensial tersebut diasumsikan bahwa garis pantai lurus sepanjang sumbu  $x$  ( $y=0$ ), kedalaman laut konstan, serta besarnya arus laut konstan dan paralel dengan garis pantai. Kondisi ini ditunjukkan pada Gambar 1. Berdasarkan asumsi tersebut maka diperoleh solusi untuk lepasan kontinyu adalah sebagai berikut [4],

$$C_{w,tot} = \frac{Q}{D \sqrt{\pi U \varepsilon_y x}} \times \left[ \exp \left( - \frac{U(y-y_0)^2}{4 \varepsilon_y x} - \frac{\lambda_i x}{U} \right) \right] \quad (3)$$

Substitusi persamaan (2) dan (3) ke persamaan (1) diperoleh

$$C_{w,tot} = \frac{962 U^{0.17} Q}{D x^{1.17}} \times \exp \left( - \frac{7.28 \times 10^5 U^{2.34} (y-y_0)^2}{x^{2.34}} - \frac{\lambda_i x}{U} \right) \quad (4)$$

Konsentrasi radionuklida sepanjang pusat beluk dan sepanjang garis pantai dapat dihitung dengan persamaan (4) dengan memasukkan  $y=y_0$  dan  $y=0$ .



Gambar 1. Pola sebaran lepasan efluen radioaktif untuk garis pantai yang lurus [4]

### Model Hidrodinamika untuk Perairan Dangkal

Aliran pada muara, perairan pantai dan laut tidak dapat dianggap satu dimensi. Pemodelan perilaku aliran pada muara dan perairan pantai harus menggunakan model tiga dimensi, khususnya pada muara dan daerah perairan pantai dengan batimetri yang sangat kompleks dan cukup dalam serta terjadi perlapisan (*stratification*). Untuk kasus dimana kedalaman perairan cukup dangkal dibandingkan dengan lebar perairan dan tidak terjadi perlapisan (*non stratification*) atau terjadi perlapisan yang sangat kecil (*weakly stratified*), maka variasi kecepatan dalam arah vertikal biasanya kecil dan jarang ditinjau. Untuk kasus seperti ini hanya distribusi horisontal dari kecepatan rata-rata terhadap kedalaman yang diperlukan, sehingga persamaan hidrodinamiknya cukup didekati dengan persamaan dua dimensi (*two dimensional depth average equation*) [5].

Gerak sirkulasi arus di pantai yang dangkal dapat diasumsikan sebagai aliran massa yang bercampur sempurna (homogen) mulai dari permukaan laut sampai ke dasar perairan, dan pengaruh angin di permukaan diasumsikan mencapai dasar laut [6]. Oleh karena itu pemodelan dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan yang diintegrasikan terhadap kedalaman.

RMA2 (*Resource Management Associates*) merupakan model hidrodinamik numerik dua dimensi untuk rata-rata kedalaman dengan metode elemen hingga. RMA2 menghitung solusi elemen hingga untuk bentuk Reynold dari persamaan Navier-Stokes untuk aliran turbulensi. Gaya gesekan dihitung dengan formula Manning/Chezy, sedangkan koefisien viskositas olakan digunakan untuk mendefinisikan karakteristik turbulensi [7].

Sistem persamaan yang digunakan dalam RMA2 terdiri dari dua persamaan gerak dalam koordinat Cartesian, serta satu persamaan kontinuitas untuk fluida *incompressible* sebagai berikut [8].

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left( E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gh \left( \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{g u n^2}{\left( h^{1/6} \right)^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \sin \psi + 2h \omega v \sin \phi = 0 \quad (5)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left( E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left( \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{g v n^2}{\left( h^{1/6} \right)^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \sin \psi + 2h \omega v \sin \phi = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

Dimana:

- $h$  : kedalaman air
- $u, v$  : kecepatan lokal dalam koordinat Cartesian  $x, y$
- $t$  : waktu
- $\rho$  : densitas fluida
- $E$  : koefisien viskositas olakan
- $g$  : percepatan gravitasi
- $z$  : elevasi dasar laut
- $n$  : koefisien kekasaran Manning
- $\xi$  : koefisien gesekan angin empiris
- $V_a$  : kecepatan angin
- $\psi$  : arah angin
- $\omega$  : laju rotasi angular bumi
- $\varphi$  : garis lintang lokal

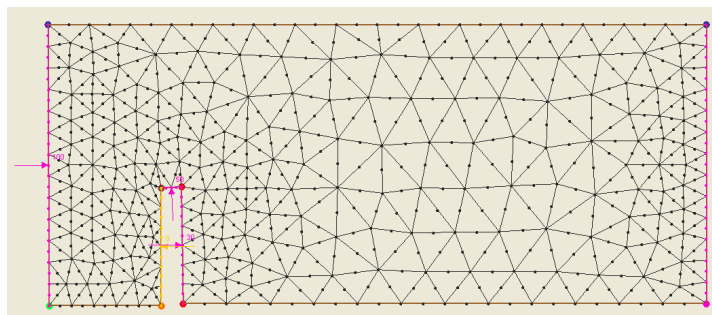
Persamaan (5), (6) dan (7) diselesaikan dengan metode elemen hingga menggunakan metode residu berpemberat Galerkin. Elemen yang digunakan dapat berupa garis satu dimensi, segi empat dua dimensi atau segi tiga, serta dapat juga memiliki sisi yang melengkung (*parabolic*). Fungsi dari bentuk elemen adalah kuadratik untuk kecepatan dan linear untuk kedalaman. Integrasi dalam ruang dilakukan dengan integral Gaussian. Turunan terhadap waktu diganti dengan pendekatan beda hingga non linear.

## METODOLOGI

Pada penelitian ini pola sebaran lepasan efluen radioaktif di laut disimulasikan dengan skenario lepasan terjadi pada jarak 100 meter dari garis pantai yang lurus dengan kedalaman laut dianggap konstan sedalam 3 meter. Arus dengan kecepatan konstan 1 m/s bergerak sejajar dengan garis pantai. Untuk memperoleh data pembanding, dalam penelitian ini dilakukan pemodelan sebaran radionuklida antropogenik di laut dengan dua metode yang berbeda, yaitu metode analitik dan metode numerik.

Metode analitik menggunakan model generik, yaitu menghitung sebaran konsentrasi radionuklida berdasarkan solusi analitik dari persamaan hidrodinamika. Pada metode ini banyak dilakukan penyederhanaan untuk mempermudah penyelesaian persamaan differensial secara analitik. Solusi analitik persamaan hidrodinamik yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung konsentrasi radionuklida sebagai fungsi dari jarak dengan menggunakan aplikasi *excel*.

Metode numerik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Surface water Modeling System (SMS)* yang menyelesaikan persamaan diferensial hidrodinamika dengan metode elemen hingga (*finite element methods*). Metode elemen hingga menggunakan elemen-elemen kecil berupa jaring-jaring (*mesh*) pada daerah pemodelan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

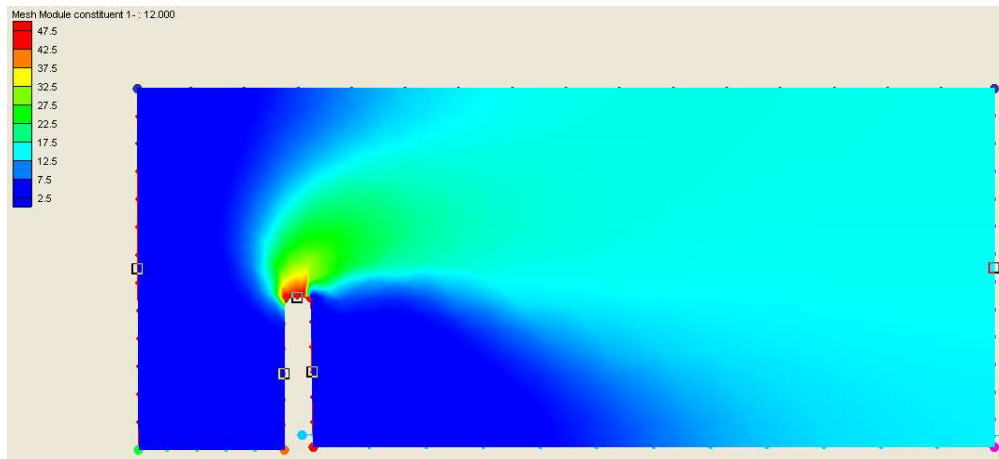


Gambar 2. Jaring-jaring (mesh) untuk metode elemen hingga

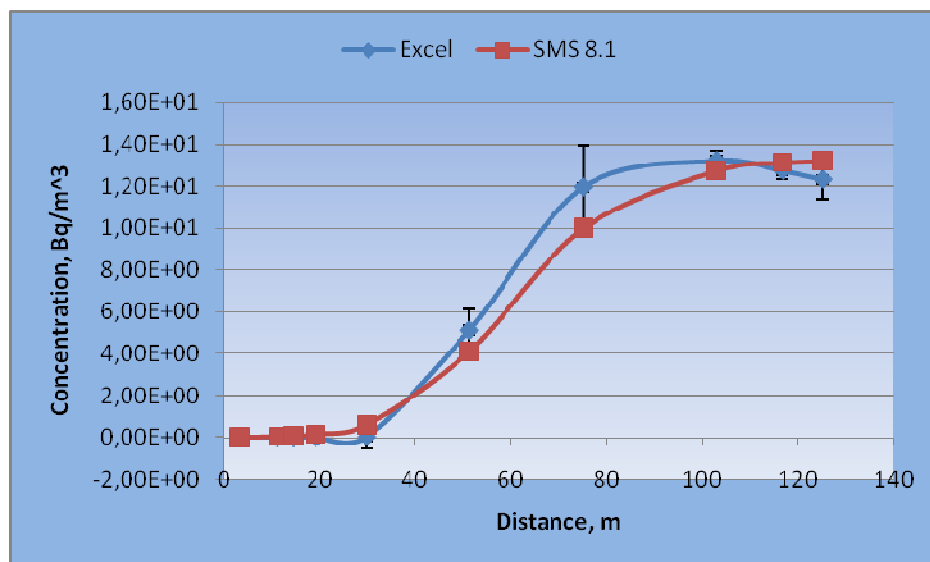
Untuk aplikasi model secara *site specific* di semenanjung Muria, Jepara dan perairan selat Bangka, digunakan data berupa peta batimetri kedalaman laut, data arus dan data pasang surut yang diperoleh dari DISHIDROS TNI AL. Untuk keperluan pemodelan, koordinat lintang dan bujur pada peta diubah ke dalam satuan meter, dimana 1 derajat setara dengan 110 km.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pola sebaran konsentrasi radionuklida hasil pemodelan dengan metode numerik menggunakan perangkat lunak SMS ditunjukkan pada Gambar 3. Titik-titik tinjau dibuat sepanjang garis pantai untuk memperoleh hasil pemodelan numerik secara kuantitatif, agar dapat dibandingkan dengan hasil pemodelan dengan metode analitik. Perbandingan hasil pemodelan metode analitik menggunakan excel dengan hasil pemodelan metode numerik menggunakan SMS ditunjukkan dalam bentuk grafik pada Gambar 4. Tampak bahwa hasil kedua metode yang digunakan tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, yaitu berkisar antara 3.07%-24.4%.

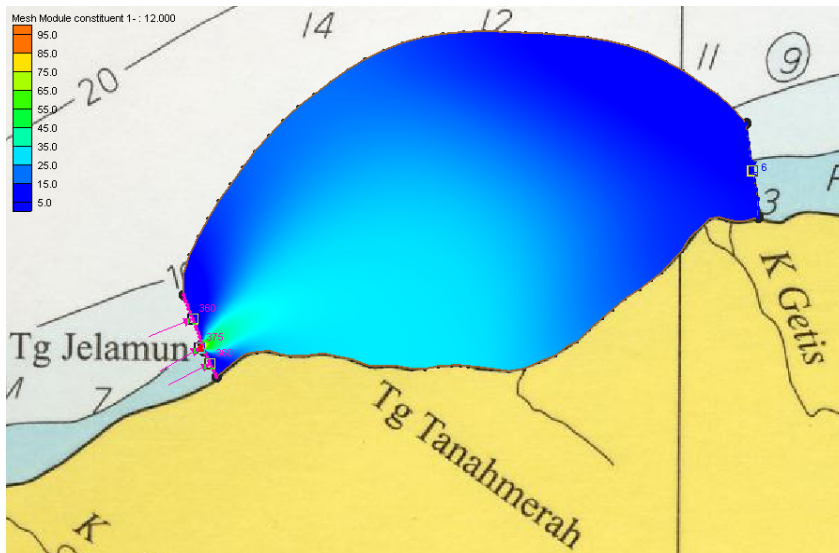


Gambar 3. Pola sebaran radionuklida dengan SMS

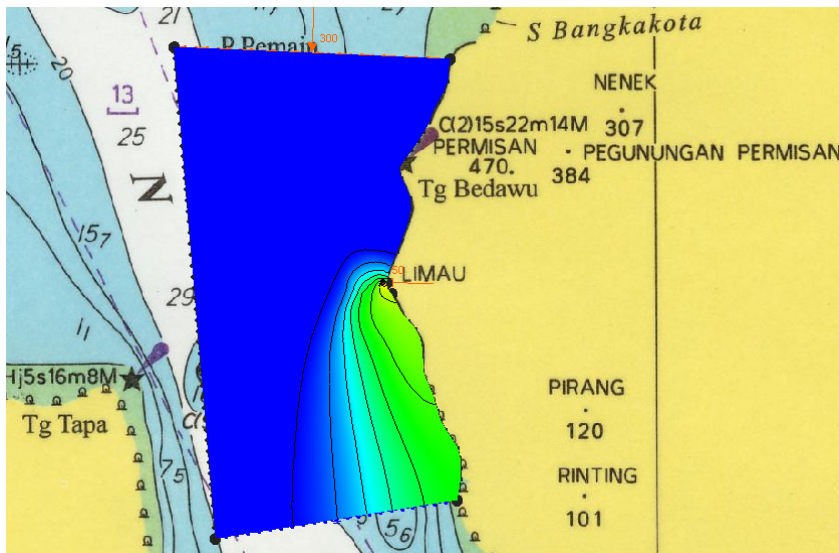


Gambar 4. Perbandingan hasil pemodelan dengan metode analitik (excel) dan numerik (SMS 8.1)

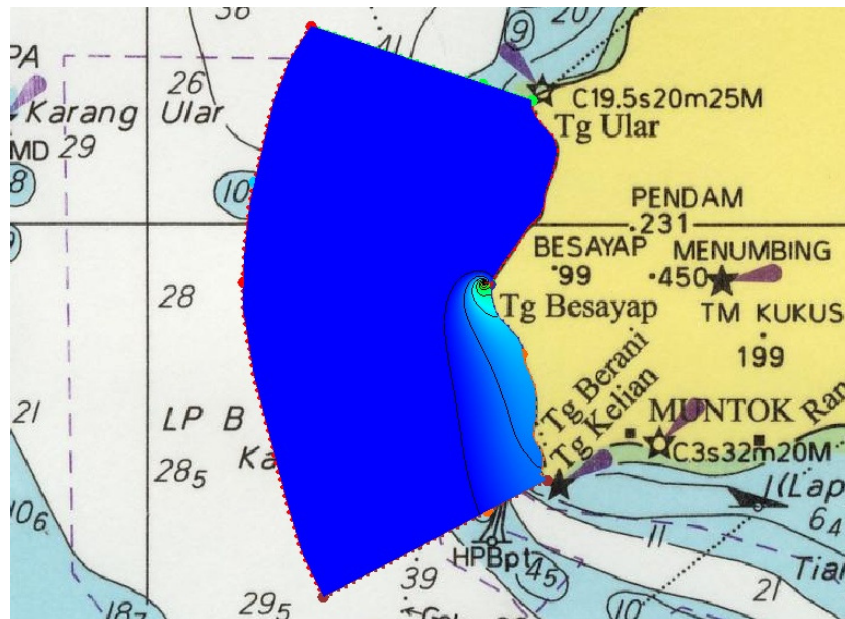
Pemodelan sebaran konsentrasi radionuklida dengan menggunakan metode numerik tidak memerlukan penyederhanaan yang terlalu banyak, sehingga dapat digunakan untuk skenario yang lebih kompleks. Oleh karena itu pemodelan dengan metode numerik dapat dilakukan secara *site specific*.



Gambar 5. Model sebaran efluen radioaktif di semenanjung Muria, Jepara



Gambar 6. Model sebaran efluen radioaktif di Bangka Selatan



Gambar 7. Model sebaran efluen radioaktif di Bangka Barat

Simulasi model sebaran efluen radioaktif di semenanjung Muria, Jepara dan perairan selat Bangka sebagai calon tapak PLTN ditunjukkan pada Gambar 5, 6 dan 7. Hasil simulasi menunjukkan bahwa arah dan kecepatan arus berpengaruh besar terhadap sebaran efluen di laut. Secara fisika dapat dijelaskan bahwa arus menyebabkan perpindahan efluen secara adveksi yang memiliki pengaruh yang lebih besar daripada perpindahan secara difusi. Ditinjau dari sudut pandang matematika, pada pemodelan sebaran efluen radioaktif ini dilakukan penyelesaian persamaan adveksi dan difusi yang menunjukkan peran arus laut dalam proses penyebaran efluen.

## KESIMPULAN

Perilaku radionuklida antropogenik di laut berpengaruh besar terhadap pola sebaran efluen radioaktif. Pemodelan sebaran efluen radioaktif dapat digunakan dalam pengkajian keselamatan PLTN untuk memprediksi besarnya dosis yang dapat diterima manusia baik dalam keadaan normal maupun kedaruratan.

Pemodelan sebaran efluen radioaktif di laut dengan metode numerik menggunakan model hidrodinamika laut dapat diaplikasikan secara *site specific* dengan memasukkan data dan parameter yang diambil dari lokasi calon tapak PLTN.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Glamore, W. C.: Hydrodynamics, Water Research Laboratory, School of Civil and Environmental Engineering, University of South Wales, (2007).
- [2]. Glamore, W. C.: Numerical Modeling, Water Research Laboratory, School of Civil and Environmental Engineering, University of South Wales, (2007).
- [3]. IAEA-TECDOC-1429, Worldwide Marine Radioactivity Studies (WOMARS): Radionuclide Levels in Oceans and Seas, International Atomic Energy Agency, Vienna, (2005).
- [4]. Safety Report Series No. 19.: Generic Models for Use In Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, International Atomic Energy Agency, Vienna, (2001).
- [5]. Yulianto, P.: Justifikasi Pemakaian Model Numerik Dua Dimensi (2D) Transport Sedimen di Muara, Tesis Program Studi Ilmu Teknik Sipil, Kekhususan Manajemen Sumber Daya Air, Program Pasca Sarjana Bidang Ilmu Teknik, Universitas Indonesia, Depok, (2005).

- [6]. Ismanto, A., Widada, S., Susiati, H.: Kajian Dispersi Termal dalam Rencana Pembangunan PLTN Muria: Sebuah Analisis, Jurnal Geoaplika, Vol. 3, No. 3, (2008).
- [7]. Petrescu, V., Sumbasacu, O.: Comparison Between Numerical Simulation and Measurements of the Pollutant Dispersion in a River Case Study, U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 72, Iss. 3, (2010).
- [8]. King, I.: Users Guide to RMA2 WES Version 4.3., Edited by Donnel, B. P., 1997. New York, US Army Corps of Engineer – Waterways Experiment Station, Hydraulics Laboratory, Wex Tech System. (1996).