

# MODEL PERGERAKAN TUMPAHAN MINYAK DI PERAIRAN SELAT SUNDA DENGAN GNOME ANALYSIS

Agus Salim\* dan Taufik Edi Sutanto

Prodi Matematika, Fakultas Sains dan Teknologi UIN Syarif Hidayatullah Jakarta

\*Corresponding author: agussalim@yahoo.com

## Abstract

*Sunda Strait is an area of strait that has potential for enormous natural wealth. However, this potential is threatened by oil spills that occurred due to the activities of transportation and storage of crude oil. A study of ecological risk assessment of oil spills was conducted to measure the magnitude of the threat of oil spills and to have preemptive strategies to minimize the impact if a large-scale oil spills occur in the future. From the analysis of the trajectory, it can be concluded that the areas that are vulnerable to the impact of the oil spill were Panimbang Beach, Wells Island, Coastal Cigeulis, Cimanggu, Selat Panaitan, Cilegon, Anyer, Mediation, and Jabung Sragi. The applicability of the trajectory final data can be used as a reference in determining the risk level of oil particles which expose to ecosystems around the Sunda Strait and the foremost result was that it would be used to minimize the impact of the oil spills in the future.*

**Keywords:** Oil spills, Sunda Strait, trajectory

---

## PENDAHULUAN

Pada saat terjadi sebuah bencana tumpahan minyak di laut, hal utama yang menjadi perhatian adalah akan kemanakah minyak yang tumpah tersebut akan mengalir atau dampak apa yang akan ditimbulkannya. Mengetahui lintasan (trajectory) dari tumpahan merupakan informasi penting untuk menentukan kebijakan lanjutan dalam menangani bencana tersebut, terutama untuk menyelamatkan lingkungan dan melakukan pembersihan. Tanpa penanganan yang tepat maka kerugian kerusakan lingkungan akan berdampak luas hingga jangka waktu lama.

Namun demikian untuk dapat memperkirakan pergerakan tumpahan minyak di laut secara tepat sangatlah sulit untuk dilakukan. Hal ini disebabkan cukup banyak proses kimiawi dan fisik yang terlibat serta pada saat bencana terjadi informasi yang ada biasanya tidak lengkap. Untuk mengatasi hal tersebut perlu adanya suatu pemodelan lintasan (trajectory) sedini mungkin dengan data yang senantiasa diperbaharui sehingga jika terjadi tumpahan minyak, penanggulangan yang efektif dan efisien dapat dilakukan dengan baik.

Sebuah pemodelan lintasan tumpahan minyak akan menganalisis berbagai akibat dan kemungkinan dari pergerakan minyak. Analisis harapan dari berbagai kemungkinan tersebut adalah suatu simulasi yang biasa disebut sebagai analisis trajectory. Hasil akhirnya berupa sebuah peta prediksi dari pergerakan minyak yang dapat dimanfaatkan untuk membantu penanganan bencana tumpahan minyak.

Pada saat awal tumpahan minyak terjadi prediksi jalur tumpahan minyak biasanya terhambat oleh data yang tidak lengkap. Detail tumpahan minyak (lokasi, volume, tipe minyak) seringkali masih berupa perkiraan. Lebih jauh lagi data lingkungan sekitar (angin, arus laut, dan kedalaman) terkadang tidak terhimpun atau bahkan tidak tersedia. Meskipun demikian pemodelan harus dilakukan dengan mengamati data dan mencoba untuk mengerti sifat fisik dan kimiawi yang akan mempengaruhi pergerakan minyak dan kelanjutan dari tumpahan tersebut.

Dengan pemahaman proses-proses fisik, ilmuwan dapat menganalisis situasi yang ada dan melakukan sebuah prediksi. Bila

prediksi awal tidak akurat, tim model tumpahan minyak perlu mengkaji ulang informasi yang ada (termasuk memperbaharui) dan memperbaiki prediksi. Sebuah prediksi yang tidak akurat biasanya disebabkan oleh kesalahan informasi tentang tumpahan (misal lokasi dan volume) atau ketidaktepatan informasi lingkungan (cuaca, angin, dan arus). Seiring berjalannya waktu prediksi akan menjadi semakin akurat, karena kondisi awal menjadi semakin tidak signifikan untuk prediksi. Sebagai ilustrasi, bagan alur analisis trajectory. Untuk mendapatkan sebuah analisis trajectory yang baik suatu faktor ketidakpastian perlu untuk diikutsertakan dalam pemodelannya. Ketidakpastian tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor, diantaranya detail tumpahan, kondisi minyak, angin, dan arus. Lebih jelasnya Tabel 1 merupakan informasi yang diambil dari Abdulfatai & Alhassan (2006) yang dapat menjelaskan lebih rinci akan besarnya pengaruh ketidakpastian.

Salah satu proses oil weathering adalah Evaporasi, yaitu perubahan dari suatu cairan menjadi bentuk gas. Pada evaporasi minyak, bagian dari minyak yang lebih ringan akan terevaporasi terlebih dahulu. Pada minyak jenis tertentu, terutama minyak jenis

ringan, sebagian besar akan terevaporasi. Pada suhu 15°C bensin akan terevaporasi sempurna setelah dua hari, 80% solar akan terevaporasi, 40% minyak light crude, 20% minyak heavy crude, dan hanya sekitar 5% untuk tipe minyak Bunker C. Secara umum seluruh proses evaporasi yang dapat terjadi akan memakan waktu kurang dari lima hari.

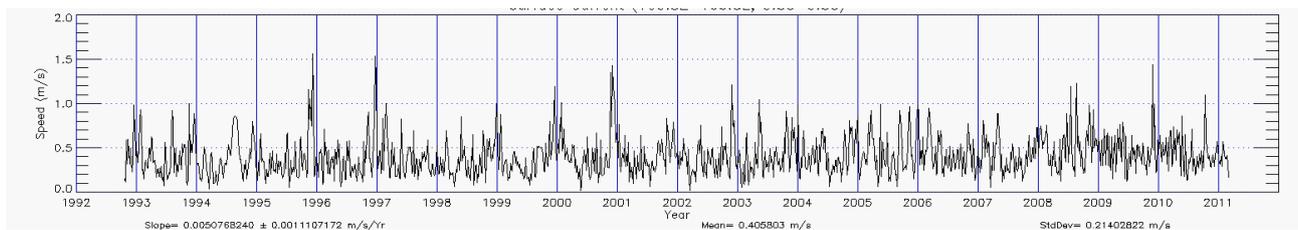
Proses *oil weathering* lainnya adalah Dispersi atau dalam hal ini pemecahan partikel minyak kecil (droplet) oleh ombak (gelombang/waves) dapat terjadi bila diameter droplet minyak relative kecil (50-70 micron). Partikel minyak yang terpecah menjadi penting, karena hal tersebut merupakan salah satu faktor yang dapat digunakan untuk menghilangkan partikel minyak dari permukaan laut. Banyaknya partikel minyak yang terpecah berantung pada sifat minyak yang tertumpah. Diantara sifat yang mempengaruhi tersebut adalah kekentalan (viscosity) minyak dan keadaan air laut.

## MATERIAL DAN METODE

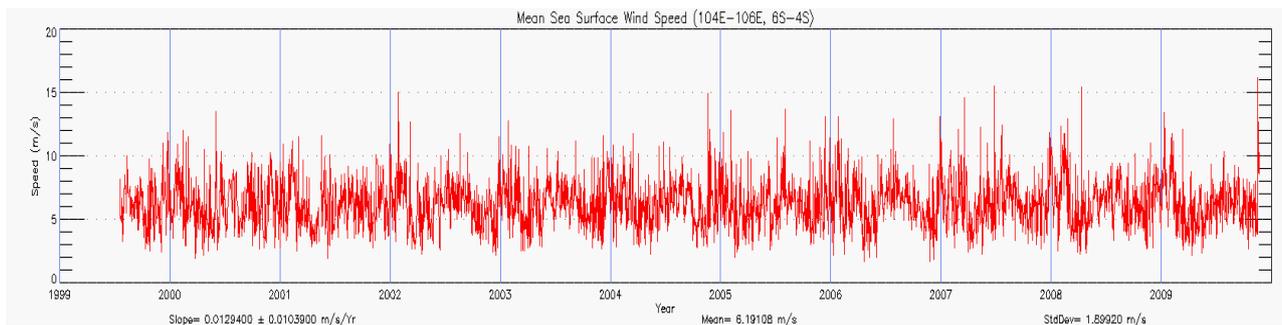
Penelitian dilakukan di Selat Sunda, Lokasi studi *trajectory* berada pada koordinat 7°24'-7°45' lintang selatan dan 108°25'-108°45' bujur timur (Gambar 1).



**Gambar 1.** Lokasi studi kasus tumpahan minyak



**Gambar 2.** Kecepatan arus di Selat Sunda (mingguan) dari tahun 1992-2011



**Gambar 3.** Kecepatan angin di Selat Sunda berdasarkan satelit QuickSCAT

Waktu yang digunakan dalam studi kasus analisis *trajectory* dalam penelitian ini terbagi menjadi dua kasus. Kasus pertama adalah kasus ketika tumpahan terjadi pada awal tahun (Maret) dan akhir tahun (Oktober). Kedua kasus ini dipilih karena karakteristik arus laut sepanjang tahun menurut data satelit Ocean Surface Currents (OSCAR) berbeda pada bulan-bulan tersebut. Pada bulan Maret, arus cenderung bergerak dari arah utara ke selatan sedangkan pada bulan Oktober (akhir tahun) terdapat kecenderungan dari tahun ke tahun arus akan bergerak dari Samudera Hindia masuk ke Samudera Pasifik bagian barat.

Data kecepatan arus mingguan di Selat Sunda dari tahun 1992 hingga 2011 awal (Gambar 2). Dalam bentuk tabel, sebagian data tersebut dapat dilihat pada Lampiran 1. Dari kedua data tersebut dapat terlihat bahwa terdapat kecenderungan data kecepatan arus di Selat Sunda cenderung stasioner dengan beberapa lompatan yang biasa terjadi di awal tahun. Fakta ini dapat membantu analisis *trajectory* menjadi lebih akurat, mengingat kecepatan arus yang

cenderung tidak terlalu variatif. Rata-rata kecepatan angin di Selat Sunda dari tahun 1992-2011 adalah 0.386 m/s dengan variansi rata-rata sebesar 0.046. Dari data tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan kepercayaan 95% rata-rata angin pada suatu hari di Selat Sunda akan terletak pada interval 0.818 m/s sampai dengan 0.04 m/s.

Data penting lain yang diperlukan untuk analisis *trajectory* adalah kecepatan angin di sekitar Selat Sunda. Menggunakan data pada periode waktu yang sama, terlihat data dari satelit QuikSCAT bahwa angin bergerak cenderung berlawanan arah dengan arus sehingga mengakibatkan pergerakan minyak cenderung tidak terlalu jauh.

Rangkuman grafik pada data kecepatan angin mingguan selama beberapa tahun (Gambar 2) menunjukkan sifat yang sama dengan arus, yaitu stasioner dengan beberapa pengecualian lompatan pada beberapa kasus waktu (dalam bentuk tabel, sebagian data tersebut dapat dilihat pada Lampiran 1). Rata-rata kecepatan angin dari 3750 data adalah 6.191 m/s dan variansi sebesar 0.767. Selang kepercayaan untuk rata-

rata kecepatan angin adalah antara 7.94 hingga 4.43 m/s. Data penting lain dari analisis *trajectory*, tentu saja data tumpahan minyak itu sendiri. Di Selat Sunda terdapat beberapa tangki kilang minyak dan distribusi minyak produk level tinggi (bensin, solar, minyak tanah, dll) namun tidak menutup kemungkinan terjadinya tumpahan produk minyak dengan kekentalan tinggi seperti oli mesin. Berikut adalah karakteristik dari ketiga tipe minyak tersebut yang akan digunakan sebagai input data analisis *trajectory*.

Data terakhir yang dibutuhkan untuk melakukan analisis *trajectory* adalah data peta polygon Selat Sunda. Gambar 3 menunjukkan polygon dari wilayah perairan Selat Sunda. Sebagian koordinat bujur dan lintang verteks-verteks dari polygon tersebut dapat dilihat pada Lampiran 2 yang terdiri dari 287 verteks yang membangun 2 kepulauan besar Jawa dan Sumatera serta beberapa pulau kecil diantaranya.

**Model Matematis**

Model tumpahan minyak biasanya terdiri dalam tiga tahapan model (Howlett1, 2008). Prediksi *trajectory* tumpahan minyak menggunakan data actual atau percobaan. Model ini disebut juga sebagai model deterministik dan menghasilkan sebuah ekspektasi prediksi dari tumpahan minyak. Model kedua, *Backtrack*, menjalankan model deterministik secara runtun waktu terbalik dan biasanya digunakan untuk menentukan sumber minyak yang didapatkan di laut atau pantai. Model ini terkadang disebut juga sebagai “model misteri” dan digunakan sebagai alat untuk mengidentifikasi adanya tumpahan minyak yang dilakukan secara sengaja.

Membangun sebuah model matematika yang akan mencerminkan mdel yang sesungguhnya di dunia nyata bukanlah suatu proses yang mudah. Model yang dibuat haruslah dapat diterima karena kemiripan sifat dengan model aslinya. Oleh karena itu beberapa asumsi harus dibuat terlebih dahulu sebelum pemodelan dapat dilakukan. Asumsi yang digunakan dalam pemodelan penyebaran tumpahan minyak yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- 1). Penyebaran searah dengan arah arus air.
- 2). Ukuran maksimum tumpahan (droplet) adalah ukuran partikel minyak sedemikian sehingga ia tidak akan mengambang.
- 3). Arus diasumsikan konstan dan tenang (placid).
- 4). Efek suhu, angin, dan tekanan diabaikan.

Menggunakan asumsi-asumsi tersebut diharapkan model yang terbentuk dapat mewakili penyebaran minyak yang sesungguhnya. Model tersebut akan dikombinasikan dengan model system persamaan differensial hidrodinamika fluida seperti yang dikemukakan Feng dan Yong (2009):

$$\frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} + g \frac{\delta w}{\delta x} = -g \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{(w+h)c^2} + fv$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + u \frac{\delta v}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta y} + g \frac{\delta w}{\delta y} = -g \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{(w+h)c^2} + fu \quad (1)$$

$$\frac{\delta w}{\delta t} + \frac{\delta[(w+h)u]}{\delta x} + \frac{\delta[(w+h)v]}{\delta y} = 0$$

*u*, *v* adalah kecepatan arus terhadap komponen timur dan utara (bujur dan lintang), *w* adalah kedalaman laut, *t* waktu, *h* kedalaman air diasumsikan tidak dipengaruhi arus atas, dan *c* adalah suatu ketetapan koefisien tertentu.

Pada permasalahan nyata tentu saja terdapat sebuah batasan [pantai] yang merupakan sebuah *Boundary Condition* (BC) bagi gelombang. BC yang dipergunakan dalam pemodelan penelitian ini menggunakan formula

$$\zeta_{(i,j)}(k) = H_{(i,j)} \cos(\sigma k - g_{(i,j)}), \quad k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (2)$$

dimana H adalah amplitudo, g jeda fase (*phase lag*), N banyaknya langkah dalam satu periode gelombang, dan  $\sigma$  adalah frekuensi angular dari komponen gelombang.

Dari model hidrodinamik yang telah ditetapkan diatas, kemudian model gelombang laut dikembangkan dengan memperhatikan gravitasi permukaan gelombang akibat angin, atau yang biasa disebut sebagai *irregular long crested* (ILC). ILC ditambahkan dengan cara menambahkan sejumlah gelombang *regular long crested* (RLC) dengan amplitudo dan panjang

gelombang yang berbeda-beda, sehingga pada saat tertentu tinggi gelombang dimodelkan sebagai berikut:

$$\zeta = H_{tide} + \sum_{i=1}^n \zeta_{at} \cos(k_i(x \sin \theta + y \cos \theta) + \omega_i t + \varphi_i) \quad (3)$$

$H_{tide}$  adalah tinggi gelombang,  $g$  adalah percepatan gravitasi,  $\theta$  arah propagasi gelombang,  $\theta \in [0, 2\pi]$ ,  $t$  adalah waktu,  $\varphi_i$  adalah sudut fase,  $k_i$  adalah gelombang yang didapat dari persamaan dispersi.

Model untuk difusi minyak terdiri dari tiga bagian: difusi gravitasi, difusi glutinosity, dan difusi tekanan permukaan. Ketiga bagian model tersebut diberikan oleh persamaan berikut:

$$r(t) = K_1(\Delta g V t^2)^{1/4} \quad (4)$$

$$r(t) = K_2(\Delta g V t^{2/3} / \nu^{1/2})^{1/6} \quad (5)$$

$$r(t) = K_3(\sigma^2 t^3 / \rho^2 \nu)^{1/4} \quad (6)$$

dimana  $\Delta g = (\rho - \rho_o) * g / \rho$ ,  $\rho_o$  dan  $\rho$  adalah adalah kepadatan minyak dan air.  $r(t)$  adalah skala difusi minyak,  $\sigma = \delta_{wa} - \delta_{ao} - \delta_{ow}$ , dimana  $\delta_{wa}$ ,  $\delta_{ao}$ , dan  $\delta_{ow}$  adalah tekanan permukaan antara air dengan udara, minyak dengan udara, dan minyak dengan air.  $\nu$  adalah koefisien kekentalan kinematik air,  $t$  menyatakan waktu,  $V$  sebagai volume minyak, dan  $k_1$ ,  $k_2$ , dan  $k_3$  adalah koefisien percobaan dengan nilai tertentu (biasanya antara 1-1,5).

Pemodelan di atas memperhitungkan setiap satuan tumpahan (*droplet*) dari tumpahan minyak yang terjadi. Hal tersebut mengakibatkan penyelesaian model diatas menjadi sangat kompleks dan membutuhkan komputasi yang sangat tinggi. Selanjutnya hasil simulasi tersebut dilakukan dengan bantuan software aplikasi Gnome dan Spill Tool untuk melihat hasil simulasi terbaik

### Analisis Trajectory Gnome

Setelah data kelautan, geografis, dan karakteristik minyak didapatkan selanjutnya analisis *trajectory* dilakukan menurut standar internasional NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Badan khusus internasional penanganan bencana di laut Emergency Response Division (ERD), di bawah NOAA mendesain suatu *software*

khusus untuk melakukan analisis *trajectory* tumpahan minyak yang diberi nama GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment). Perangkat lunak *Gnome* akan digunakan untuk menganalisis simulasi *trajectory* dari tumpahan minyak di Selat Sunda.

*Gnome* (Gambar 4) memiliki dua fungsi utama, standar dan *diagnostic mode*. Pada *mode standar* digunakan *loc file* yang berupa informasi peta polygon, arus, angin, karakteristik minyak, kedalaman laut dan data lainnya. Pada *mode* tersebut pengguna hanya memvariasikan berbagai parameter tambahan seperti jumlah tumpahan dan pengaruh tambahan untuk melihat dampaknya terhadap perubahan *trajectory* minyak. Walaupun menggunakan *mode standar* sangatlah mudah, namun *loc file* yang tersedia sangat terbatas, yang sebagian besar adalah *loc file* laut di sekitar Amerika.

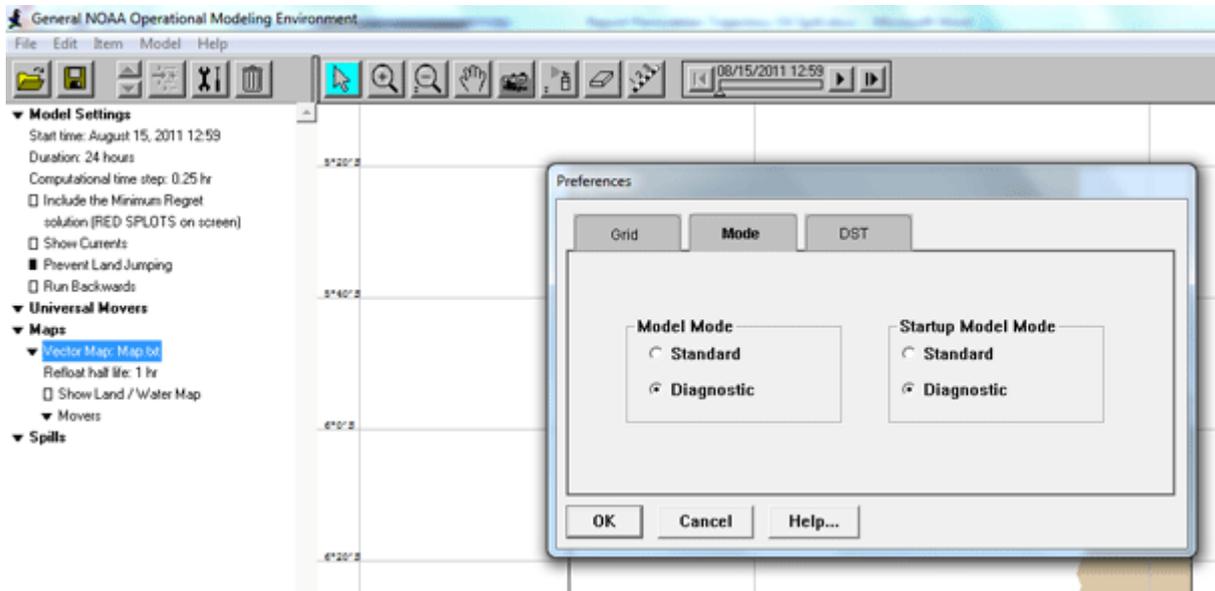
Dalam penelitian ini digunakan mode *diagnostic*, dikarenakan *loc file* untuk Selat Sunda tidak tersedia. Untuk mengawali penggunaan mode *diagnostic*, pertama-tama diperlukan peta polygon dari daerah yang akan diteliti. Peta Polygon tersebut menggunakan format BNA (Atlas Boundary File). BNA diawali dengan tiga parameter awal, sebagai contoh "234", "1", "33" yang berarti feature 234, polygon daratan, lalu terdiri dari 33 verteks. Setelah baris ini diikuti dengan 33 vertex lokasi pulau yang akan diteliti.

Parameter berikutnya dalam peta polygon adalah Batas Peta, format batas peta adalah "Map Bounds", "1", "7" yang berarti terdapat 7 verteks yang akan membatasi perhitungan pergerakan droplet minyak. Daerah yang dapat atau mungkin terjadi tumpahan minyak dinyatakan dengan "SpillableArea", "1", "15". Sama seperti sebelumnya 15 menyatakan daerah tersebut dikarakterisasi oleh 15 verteks pembatas daerah tumpahan.

Data arus laut di Gnome menggunakan format *CATS - Finite Element - Velocities on Triangles, Steady State*. Gambar 5 memperlihatkan salah satu contoh penggunaan segitiga pada finite element

dalam data arus *Gnome*. Arus yang dapat digunakan tidak hanya arus permukaan, namun juga kecepatan arus pada berbagai kedalaman. Data angin dalam *diagnostic*

*mode Gnome* menggunakan format WND. Dalam format ini arah, besaran dan waktu akan kecepatan angin diberikan dalam bentuk seperti yang nampak pada Gambar 5.



Gambar 4. Perangkat lunak Analisis Trajectory ERD-NOAA Gnome

Day	Month	Year	Hour	Min.	Speed	Direction
8	4	99	01	00	0	S
8	4	99	05	00	10	S
8	4	99	09	00	10	S
8	4	99	11	00	10	S
8	4	99	15	00	10	SW

Gambar 5. Format WND untuk data angin laut pada Gnome

## HASIL DAN PEMBAHASAN

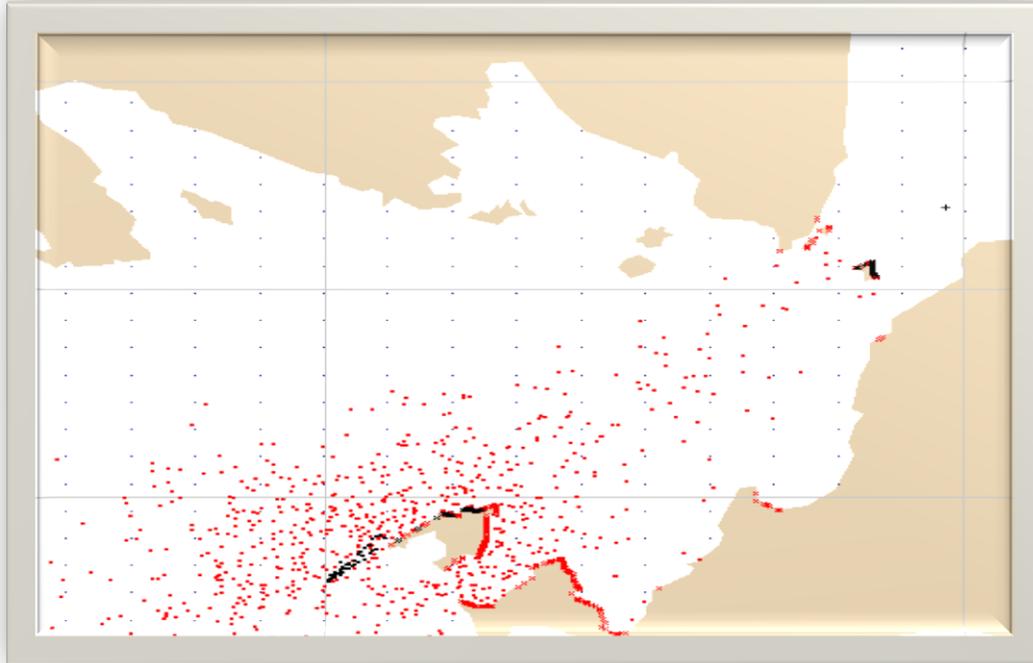
### Hasil Simulasi dan Analisis Ketidakpastian

Simulasi tumpahan minyak jenis medium *crude oil* sebesar 3000 barrel dilakukan dengan tumpahan berawal dari jalur distribusi minyak. Simulasi memanfaatkan data angin dan arus seperti yang sudah dijabarkan sebelumnya menggunakan data musim awal tahun, dalam hal ini bulan Maret. Setelah menjalankan simulasi selama beberapa hari, didapatkan hasil seperti pada Gambar 6. Dari simulasi tersebut dapat disimpulkan bahwa daerah yang terkena dampak, bila terjadi tumpahan pada awal tahun adalah Sumatera bagian selatan (Penengahan), Pantai Cigeulis, Pulau Sumur dan Selat Panaitan. Dampak terbesar terjadi di Pulau Sumur 1.

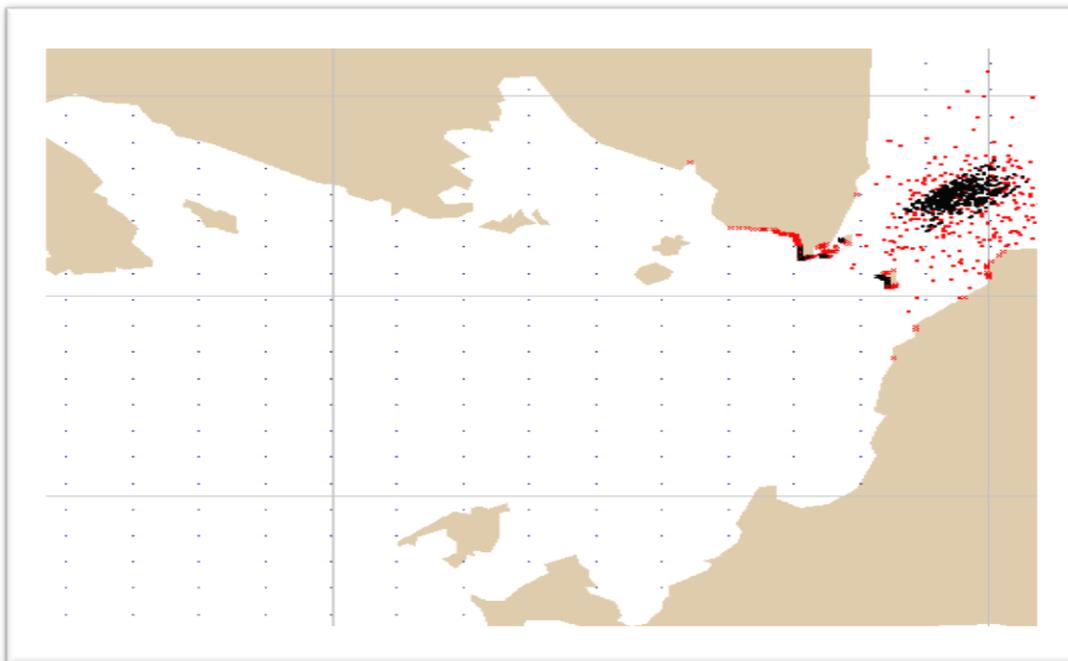
Simulasi berikutnya dilakukan menggunakan data musiman untuk akhir tahun. Jumlah tumpahan dan jenis minyak sama seperti simulasi sebelumnya. Hasil simulasi dalam jangka waktu empat hari setelah tumpahan diberikan dalam Gambar 7. Hasil simulasi selama empat hari untuk data simulasi akhir tahun (Gambar 8) menunjukkan bahwa Selat Sunda minimal terkena dampak tumpahan minyak. Dalam minggu pertama daerah di sekitar Bojonegara, Anyer dan Penengahan terkena dampak yang cukup besar. Dalam waktu lebih dari dua minggu jika jumlah tumpahan cukup banyak, maka ada kemungkinan pencemaran akan menjangkau Kalimantan dan negara tetangga Singapura. Permasalahan berikutnya yang cukup penting untuk dianalisis adalah dampak pencemaran pada lokasi-lokasi yang telah

disebutkan di atas. Untuk menganalisis tingkat pencemaran tersebut digunakan ROC (*Response Options Calculator*). Dengan menggunakan parameter yang sama dengan

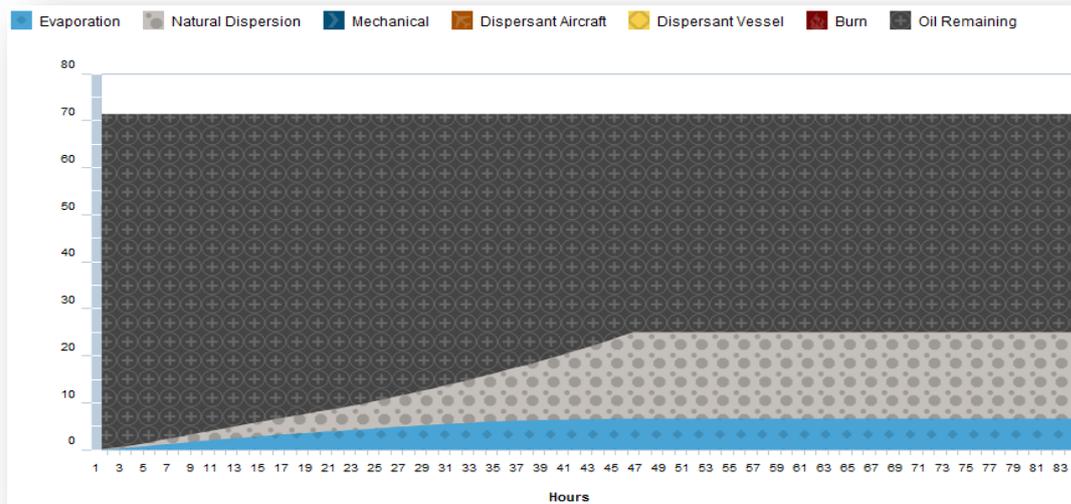
*trajectory Gnome*, ROC dapat menghitung bagian minyak yang telah melalui proses *Oil Weathring* (evaporasi, dispersi, dan residue) (Gambar 8).



**Gambar 6.** Simulasi pergerakan minyak di Selat Sunda setelah 10 hari



**Gambar 7.** Simulasi jika tumpahan minyak terjadi pada akhir tahun



**Gambar 8.** Hasil perhitungan presentasi kadar pencemaran di Selat Sunda

## KESIMPULAN

Dari analisis *trajectory* yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa daerah yang rawan terkena dampak tumpahan minyak adalah Pantai Panimbang, Pulau Sumur, Pantai Cigeulis, Cimanggung, Selat Panaitan, Cilegon, Anyer, Penengahan dan Jabung Sragi. Saran dari penelitian ini adalah penelitian ini masih dalam skala laboratorium

(simulasi). Akan lebih lengkap bila dilakukan proses validasi terhadap hasil simulasi pergerakan partikel minyak di akhir pengamatan dengan waktu bukan dan kondisi sebenarnya di lapangan sehingga akan dapat terlihat validitas dan keakuratan model yang dibangun. Penelitian ke depan adalah melakukan proses validasi hasil akhir tersebut pada kondisi iklim sebenarnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Jimoh Abdulfatai & Alhassan Mohammed. (2006). Modelling and Simulation of Crude Oil Dispersion, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 8:17-28
- Yu, F., & Yin, Y. (2009). Oil Spill Visualization Based on the Numeric Simulation of Tidal Current, *The International Journal of Virtual Reality*, 8(2), 71-74.
- Iorgos V., & Spiros, A. (2008). Gnort: High Performance Network Intrusion Detection Using Graphics Processors, *Proceedings of the 11th International Symposium On Recent Advances In Intrusion Detection (RAID)*
- Schatz, M. C., Trapnell, C., Delcher, A. L., & Varshney, A. (2007). High-throughput sequence alignment using Graphics Processing Units. *BMC Bioinformatics* 8, 474.
- Manavski, Svetlin A., & Giorgio, V. (2008). CUDA compatible GPU cards as efficient hardware accelerators for Smith-Waterman sequence alignment. *BMC Bioinformatics*.
- Delvigne G. A. L., & Sweeney C. E., (1988). *Natural Dispersion of oil*, *Oil and Chemical Pollution*, 4(4), 281-310.