

MODEL PERGERAKAN BAHAN PENCEMAR MINYAK DIESEL PADA AKUIFER BATUPASIR FORMASI VOLKANIK MERAPI MUDA

Wahyu Setyaningsih
Jurusan Geografi FIS UNNES

Abstrak

Pencemaran merupakan penyebab utama penurunan kualitas airtanah terutama di daerah perkotaan. Pencemaran umumnya disebabkan oleh aktifitas manusia diantaranya penggunaan bahan bakar hidrokarbon. Salah satu produk hidrokarbon yang digunakan dalam transportasi missal adalah bahan bakar minyak disel. Minyak disel digunakan sebagai bahan bakar kereta api di Indonesia. Dalam proses pemanfaatan minyak disel terjadi pencemaran airtanah di daerah Jlagran-gandekan, yogyakarta. Penelitian dilakukan dengan melakukan penyelidikan kondisi sistem alami daerah penelitian. Benzene digunakan sebagai parameter dalam pemodelan transport polutan. Kadar benzene diperoleh dari hasil analisa sampel airtanah pada sumur-sumur penduduk. Data kondisi sistem alami dan kadar benzene diolah dengan menggunakan perangkat lunak *Visual Modflow 3.1.0*. Model yang dihasilkan dapat digunakan untuk membuat prediksi penyebaran pencemaran pada masa mendatang. Dari hasil pemodelan diketahui bahwa airtanah didaerah penelitian bergerak dari utara ke selatan dan barat daya. Karena berat jenisnya lebih ringan dari air, partikel benzene akan bergerak mengikuti arah aliran airtanah. Waktu tempuh benzene dalam airtanah rata-rata 1,99 tahun. Pada tahun 2010 diprediksikan panjang penyebaran pencemaran solar adalah 900 meter dengan konsentrasi solar kurang lebih 36585,36 mg/l. Penanggulangan pencemaran hidrokarbon di daerah penelitian dapat dilakukan dengan melakukan pemompaan, pembuatan tanggul penahan dan bioremediasi.

Kata-kata Kunci : *Pemodelan, Hidrokarbon, Plume*

PENDAHULUAN

Penemuan bahan bakar fosil atau hidrokarbon merubah perilaku manusia. Perkembangan teknologi transportasi yang berdasarkan pada penggunaan hidrokarbon membuat manusia tergantung pada ketersediaan hidrokarbon. Selain berdampak positif penggunaan hidrokarbon dapat menyebabkan timbulnya dampak negatif seperti pencemaran tanah, air dan udara oleh hidrokarbon. Solar atau minyak disel merupakan salah satu produk turunan hidrokarbon yang digunakan dalam

transportasi massal seperti kereta api dan angkutan umum.

Salah satu pencemaran minyak disel terjadi di daerah JIagran-Gandekan, Gedongtengen, Yogyakarta dan efeknya masih dirasakan hingga sekarang. Sumur-sumur penduduk yang mengalami pencemaran menjadi kotor, berminyak, lengket dan berbau sehingga tidak dapat dimanfaatkan lagi karena kualitasnya sangat buruk. Pencemaran diindikasikan berasal dari tangki penyimpanan BBM milik PT Kereta Api Indonesia Daerah Operasi VI Yogyakarta yang ditanam dalam tanah dan

mengalami kebocoran pada tahun 1998 (Kedaulatan Rakyat, 21 Maret 2003).

Pencemaran *Nonaqueous Phase Liquid* (NAPL)

Nonaqueous Phase Liquid (NAPL), merupakan kontaminan hidrokarbon yang tidak larut, yang berbeda kelakuan dan sifat-sifatnya dengan kontaminan yang larut (Bedient, *et al.*, 1999). NAPL yang bergerak dari permukaan tanah dan mencapai permukaan airtanah akan mekar (*spread*) seperti cendawan dari titik mulai bersentuhan dengan airtanah, menyebar searah dengan gerak aliran airtanah, meluas dan menjauh dari titik awal sentuhan. Pemekaran berbentuk cendawan inilah yang disebut sebagai “*Plume*”.

Menurut Bedient, *et al.* (1999), NAPL dikelompokkan menjadi dua yaitu:

1. *Light Nonaqueous Phase Liquid* (LNAPL)

Merupakan NAPL yang memiliki berat jenis lebih kecil dari air. LNAPL berhubungan dengan produksi minyak, penyaringan, *wholesale distribution* dan *retail distribution* dari produk minyak. Rembesan dari bensin, minyak tanah dan minyak disel merupakan sumber LNAPL yang menuju ke airtanah. LNAPL akan merembes masuk dari permukaan ke zona tidak jenuh air dan bergerak mengikuti aliran airtanah. Zat-zat kimia yang berasosiasi dengan LNAPL diantaranya *benzene*, *toluene*, dan *decane*.

2. *Dense Nonaqueous Phase Liquid* (DNAPL)

Merupakan NAPL yang memiliki berat jenis lebih besar dari air. Jika DNAPL dalam jumlah besar masuk kedalam airtanah pergerakannya

akan terus berpindah sampai terjebak sebagai *residual hydrocarbon* atau sampai mencapai batuan berpermeabilitas rendah. Pergerakan DNAPL dikontrol densitas dan struktur bawah permukaan bukan oleh pergerakan airtanah. DNAPL berasosiasi dengan berbagai aktifitas industri seperti industri kimia, pupuk, industri batubara, industri baja dan sebagainya. Bahan kimia utama dari pelarutan DNAPL adalah *chlorinated aliphatic hydrocarbons* dan bahan organik seperti *polyaromatic hydrocarbons* (PAHs), dan *pentachlorobiphenyls* (PCBs).

Pencemaran *Light Nonaqueous Phase Liquid* (LNAPL)

Minyak disel yang beredar di Indonesia dalam Hardjono (2001), mempunyai berat jenis rata-rata 0,87 gr/cm³ atau lebih kecil dari berat jenis air (± 1 gr/cm³), sehingga termasuk dalam LNAPL. Pencemaran minyak disel akan terkonsentrasi pada permukaan airtanah saja dan perubahan secara fisik, biologi dan kimia terbatas pada kedalaman tertentu.

Proses yang terjadi pada waktu minyak disel transportasi kedalam airtanah akan menyebabkan konsentrasi minyak disel berkurang akan tetapi minyak disel merupakan bahan pencemar yang sulit larut dan pengaruh alami lainnya (akuifer, hidrogeologi, geologi). Minyak disel merupakan hasil pengolahan hidrokarbon yang sulit larut dalam air sehingga waktu alirnya akan lebih lama dibandingkan air sehingga mengakibatkan pencemaran minyak disel pada suatu wilayah akan berlangsung dalam jangka waktu relatif lama karena beberapa unsur akan terserap dan tersimpan dalam butiran-butiran tanah (Bedient, *et al.*, 1999).

Airtanah alami tidak berwarna, berbau dan berasa, sedangkan secara kimia dan biologi tidak mengandung unsur biotik maupun kimia yang berbahaya. Airtanah yang mengalami pencemaran dapat dicirikan oleh adanya perubahan fisik, biologi, kimia maupun gabungan dari ketiga proses tersebut. Kadar minyak dan produk petroleum yang diperbolehkan di dalam air minum berkisar 0,01–0,1 mg/liter. Kadar yang melebihi 0,30 mg/liter dapat bersifat toksik bagi ikan airtawar. Selain mengganggu organisme dalam air pencemaran minyak sel akan mengancam kesehatan manusia karena akan menimbulkan masalah penyakit seperti penyakit kulit, ginjal, liver, kanker dan gangguan organ dalam lainnya (Ibrahim, 2001).

Hasan (1996), menyebutkan bahwa *plume* akan bertambah ukurannya dan semakin memanjang ketika aliran airtanah semakin meningkat karena dispersi berhubungan dengan kecepatan. Kecepatan aliran yang rendah akan membentuk *plume* yang terkonsentrasi, sedangkan kecepatan aliran airtanah yang tinggi akan menyebabkan *plume* yang lebih luas.

Dengan menggunakan konsep dispersi, panjang *plume* pada polutan yang bersifat tidak reaktif dapat diperkirakan dengan rumus sebagai berikut :

$$PL = vt \dots\dots\dots (1)$$

- Dimana *PL* = Panjang *plume*
- v* = Kecepatan aliran air tanah
- t* = Waktu penyebaran polutan

Berdasarkan penelitian Budiarta (2000), diketahui bahwa kecepatan aliran airtanah di Yogyakarta mencapai 0,30 mm/hari, dengan

menggunakan konsep dispersi, penyebaran polutan di Jlagran-Gandekan pada tahun 2010 diprediksikan mencapai 1314 m. Hasil perhitungan tersebut tidak mutlak, dapat lebih panjang atau lebih pendek karena faktor yang mempengaruhi penyebaran polutan di lapangan sangat kompleks (faktor litologi, hidrologi, hidrogeologi, pemanfaatan lahan, dsb). Karakteristik dan mekanisme pergerakan kontaminan dalam aliran airtanah pada daerah penelitian akan dimodelkan dengan menggunakan perangkat lunak *Visual Modflow 3.1.0*.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di daerah Jlagran dan Gandekan, Gedongtengen, DIY. Penelitian dilakukan melalui beberapa tahap. Penelitian kondisi sistem alami (kondisi geologi, hidrologi dan hidrogeologi) dilakukan secara langsung dilapangan dan didukung dengan data sekunder. Kondisi geologi (jenis dan sifat batuan, kondisi geologi daerah penelitian) diperoleh dari data sumur bor. Kondisi hidrologi (pola aliran airtanah, imbuan airtanah, curah hujan, limpasan permukaan) didapatkan dari data sekunder pada stasiun pengamatan di sekitar daerah penelitian. Kondisi geohidrologi seperti jenis akuifer, sifat batuan penyusun akuifer (porositas, koefisien kelulusan air, storativitas dan transmissivitas), ketebalan akuifer dan penyebaran akuifer didapatkan dari data pengeboran dan dari data sekunder lainnya. Jenis dan kadar pencemaran dapat diketahui dengan pengambilan sampel pada sumur-sumur yang mengalami pencemaran. Sampel tersebut selanjutnya diuji kadar hidrokarbonnya di laboratorium. Minyak disel mempunyai kandungan

senyawa kimia yang kompleks sehingga untuk menyederhanakan model digunakan parameter benzene yang dianggap dapat mewakili sifat minyak disel dalam airtanah. Data-data tersebut selanjutnya digunakan dalam pembuatan konsep daerah pemodelan yang merupakan dasar dalam pembuatan model (Gambar 1).

HASIL PEMBAHASAN

Dasar dari pembuatan model pergerakan bahan pencemar minyak disel adalah pemodelan aliran

airtanah yang dibuat berdasarkan kondisi sistem alami di daerah penelitian. Model pergerakan aliran yang digunakan harus melalui tahap kalibrasi sebelum digunakan dalam pembuatan model bahan pencemar.

Pencemaran minyak disel di daerah penelitian terjadi pada bagian tengah akuifer yang tersusun atas endapan volkanoklastik Merapi Muda. Litologi yang secara umum tersusun atas perselingan batupasir, batulanau, kerikil dan batulempung menyebabkan adanya reaksi yang berbeda terhadap polutan yang masuk kedalam akuifer.

Tabel 1. Kadar hidrokarbon dan Benzene hasil analisa sampel airtanah

No. Sumur	Lokasi	Kadar Hidrokarbon mg/l	Kadar Benzene mg/l
1s	Jlagran	100839	8268,798
2s	Jlagran	10215	837,63
3s	Gandekan Lor	36	2,952
4s	Jlagran	<0,01	<0,01
7s	Gandekan Lor	<0,01	<0,01
8s	Gandekan Lor	4540	372,28
9s	Gandekan Lor	1334	109,388
10s	Gandekan Lor	256	20,992
11s	Gandekan Lor	8	0,656
12s	Gandekan Lor	36	2,952
13s	Gandekan Lor	<0,01	<0,01
14s	Sosrowijayan	<0,01	<0,01
15s	Sosrowijayan	<0,01	<0,01
62s	Sosrowijayan	<0,01	<0,01
63s	Sosrowijayan	<0,01	<0,01
64s	Sosrowijayan	<0,01	<0,01

Pemodelan Bahan Pencemar Minyak Disel

Berdasarkan hasil analisa laboratorium, dari 16 sampel yang diambil dari lokasi penelitian terdapat 8 sampel yang mengandung hidrokarbon dengan kadar 0,0008-10,08% (Tabel 1). Hidrokarbon tersebut termasuk dalam jenis minyak disel. Untuk melakukan pemodelan dibutuhkan parameter sederhana yang sifatnya sudah diketahui. Senyawa kimia yang akan digunakan dalam pemodelan adalah benzene. Benzene merupakan senyawa kimia organik yang merupakan komponen alami dari hidrokarbon. Benzene digunakan sebagai parameter karena: (1) Merupakan salah satu senyawa kimia yang berasosiasi dengan LNAPL, (2) Tidak mengalami hidrolisis dan tidak mengalami degradasi sewaktu tertransport dalam airtanah, (3) Mempunyai paruh waktu yang cukup panjang (lebih dari 2 tahun), (4) Kandungan benzene alami dalam airtanah sangat kecil ($<0,005$ mg/l), sehingga keberadaan benzene dengan kadar lebih dari 0,005 mg/l dapat menjadi salah satu indikasi pencemaran.

Pemodelan pergerakan polutan benzene, dilakukan dengan menggunakan model aliran

airtanah yang sudah terkalibrasi. Data sifat benzene selanjutnya dimasukkan dalam proses pemodelan polutan dengan menggunakan program MODPATH. Informasi tentang polutan diolah berdasarkan perubahan waktu sehingga akan diketahui penyebaran polutan pada waktu tertentu. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan 3 macam kondisi tertentu (Tabel 2).

Kondisi Awal

Sumur penduduk yang mengalami pencemaran mempunyai konsentrasi yang beragam. Pada umumnya jika dekat dengan sumber maka konsentrasinya relatif tinggi. Dari hasil analisis didapatkan bahwa penyebaran minyak disel mencapai panjang kurang lebih 350 m dan lebar 270 m (Gambar 1). Konsentrasi Benzene sebagai bagian dari minyak disel berdasarkan hasil pemodelan antara 1–8268,79 mg/l dengan waktu tempuh dalam airtanah minimal 625,67 hari dan maksimum 1880 hari. Hampir separuh (50%) dari partikel benzene mempunyai kecepatan bergerak dalam airtanah kurang dari 1253,34 hari. Dengan melihat kecepatan

Tabel 2. Parameter yang Digunakan dalam Skenario Pemodelan

Parameter	Kondisi Awal	Skenario 1	Skenario 2
Konduktivitas Hidrolika (m/hari)	10,82	10,82	50
Kondisi sistem alami lainnyav Imbuhan airtanahv <i>Spesific Storagev</i> <i>Specisic yieldv</i> Porositas batuan	Tetap (sesuai dengan kondisi sistem alami daerah pemodelan)	Tetap (sesuai dengan kondisi sistem alami daerah pemodelan)	Tetap (sesuai dengan kondisi sistem alami daerah pemodelan)
Waktu (hari)	2190	4380	4380

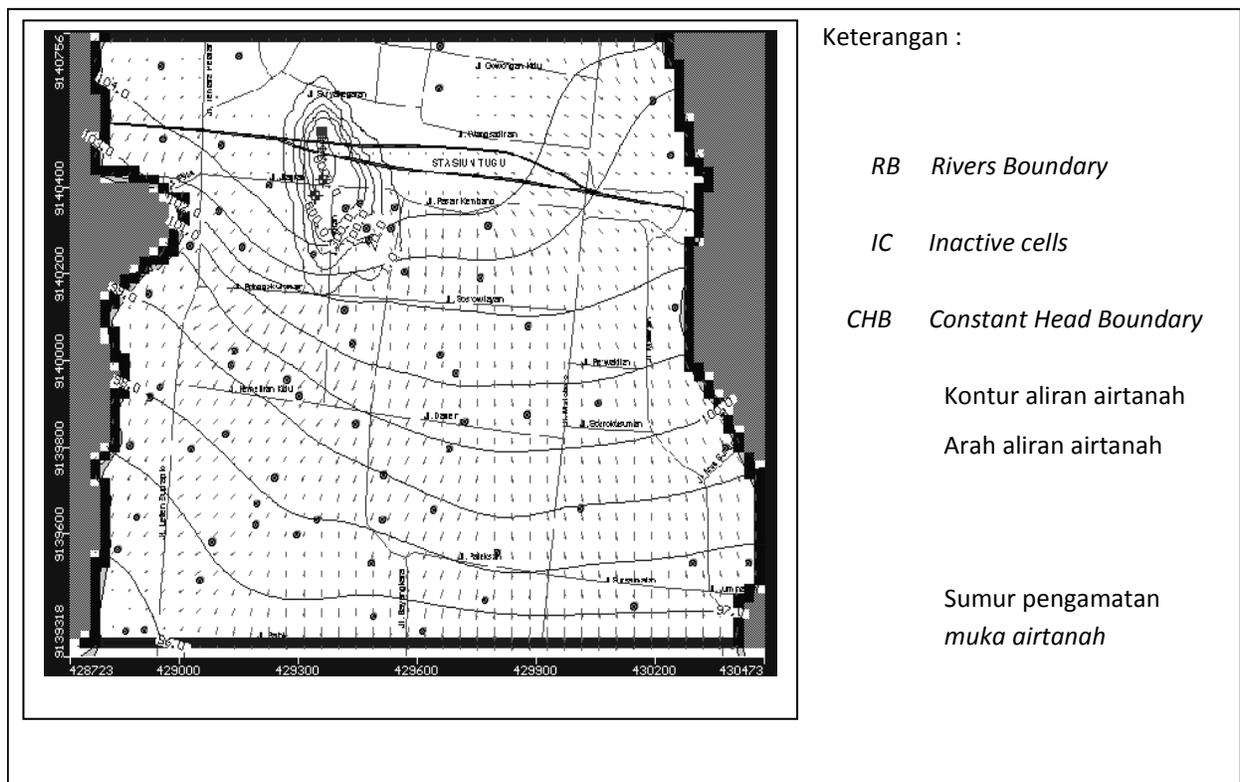
pergerakan partikel benzene dalam aliran airtanah dapat diketahui bahwa pencemaran minyak disel akan membutuhkan waktu hingga bertahun-tahun untuk berpindah tempat karena dipengaruhi oleh kondisi geohidrologi daerah yang mengalami pencemaran, sehingga dibutuhkan upaya penanggulangan pencemaran minyak disel agar airtanah bisa dimanfaatkan kembali.

Skenario 1

Dasar prediksi yang digunakan adalah perubahan waktu alir dari bahan pencemar adapun parameter-parameter lainnya tetap. Waktu yang digunakan dalam pemodelan ini adalah 12 tahun dari waktu mulai terjadi pencemaran. Waktu prediksi dipilih karena melebihi waktu maksimum kecepatan

partikel pencemar sehingga diharapkan bisa diamati bagaimana perbedaan kondisi bahan pencemarnya. Dari gambar 1, terlihat telah terjadi penurunan konsentrasi benzene yang berkisar antara 1 mg/l sampai 3000 mg/l atau lebih kecil dibandingkan kondisi awal. Waktu tempuh partikel benzene dalam airtanah maksimum 1017,57 hari, minimum 439,19 hari dengan rata-rata waktu tempuh 678,38 hari.

Pengurangan kadar pencemaran bisa disebabkan karena pergerakan bahan pencemar mengikuti aliran airtanah. Meskipun kadarnya berkurang akan tetapi daerah yang mengalami pencemaran minyak disel akan semakin meluas. Konsentrasi minyak disel akan semakin berkurang di dekat daerah sumber karena minyak disel akan



Gambar 1. Penyebaran pencemaran benzene di daerah penelitian

bergerak mengikuti lairan airtanah. Daerah pencemaran yang semula hanya disekitar daerah jlagran, 12 tahun kemudian diperkirakan akan meluas mencapai daerah Kemetiran (Gambar 2).

Skenario 2

Pada skenario ini pemodelan dibuat dengan melakukan perubahan pada konduktivitas hidrolika dari 10,82 menjadi 50 m/hari. Nilai K dipilih sebagai salah satu dasar prediksi untuk melihat pengaruh K terhadap pergerakan bahan pencemar.

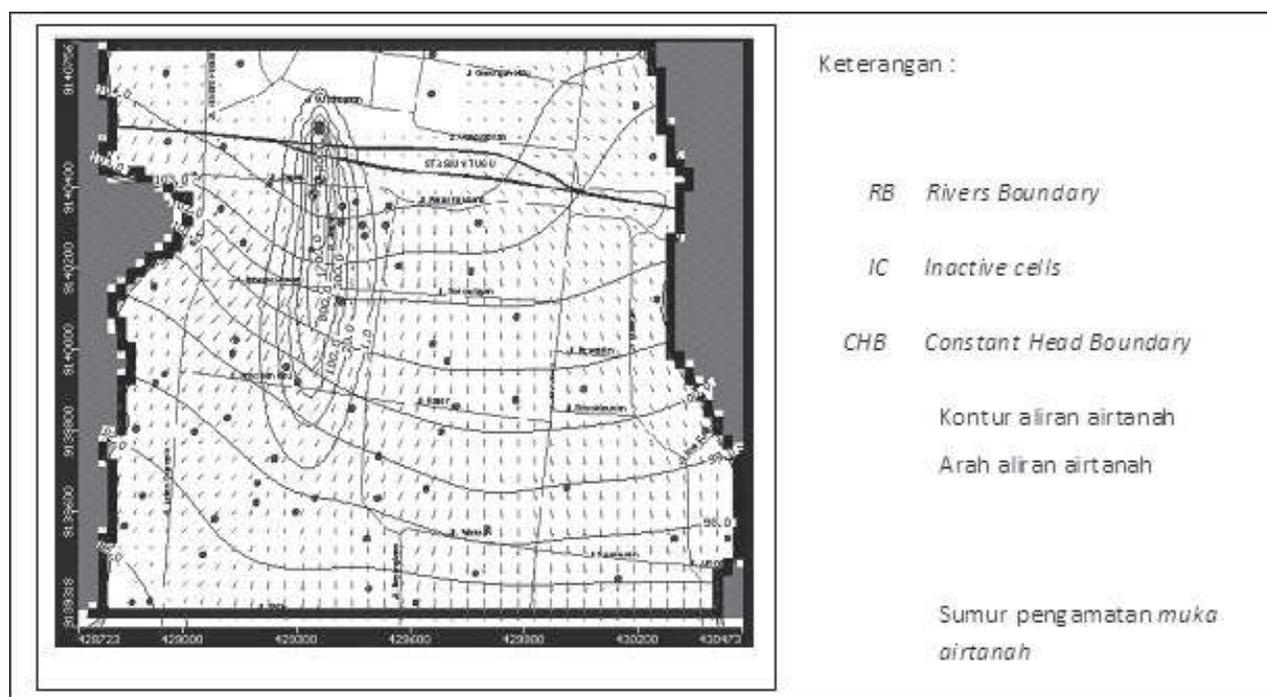
Berdasarkan skenario ini, didapatkan bahwa dalam waktu 10 tahun dari terjadinya kebocoran, kecepatan pergerakan partikel berbanding lurus dengan besarnya konduktivitas hidrolika. Waktu tempuh partikel pada kondisi ini adalah 184,595 hari dan minimum 62,85 hari. Kecepatan partikel yang

bertambah menyebabkan penyebaran pencemaran semakin cepat dan jauh dari sumber. *Plume* pada prediksi ini mencapai panjang kurang lebih 1480 m dan lebar 250 m. Kadar pencemaran hasil pemodelan berkisar antara <1– 1150 mg/l (Gambar 3).

Berdasarkan pemodelan transport polutan dari ketiga skenario diatas didapatkan hasil yang berbeda-beda terutama konsentrasi benzene dan waktu alir benzene dalam airtanah.

Penanggulangan Pencemaran Benzene

Untuk mengatasi pencemaran benzene ke daerah sekitar yang belum tercemar dibutuhkan langkah penanggulangan. Beberapa cara penanggulangan pencemaran, diantaranya dengan pemompaan, mbioremediasi dan pembuatan *physical barrier*.



Gambar 2. Gambar prediksi penyebaran benzene berdasarkan skenario 1

Tabel 3. Hasil pemodelan transport polutan dengan menggunakan 3 skenario

Parameter	Kondisi Awal	Skenario 1	Skenario 2
Kadar benzene (mg/l)	1-8268,79	1- 3000	1– 1150
Kadar solar (mg/l)	1-100829,27	1-36585,36	1-14024,39
<i>Travel time</i> Maksimum	1880	1017,57	184,59
(hari) Minimum	626,67	439,19	62,85
Panjang <i>plume</i> (m)	350	900	1480
Lebar <i>Plume</i> (m)	270	250	250

Tabel 4. Parameter Dalam Simulasi Pembuatan Sumur Pompa

Parameter	Skenario 1	Skenario 2
<i>Boundary Condition</i>	Sesuai kondisi alami	Sesuai kondisi alami
Jumlah sumur pompa	1 buah	4 buah
Debit pemompaan (ml/dt)	8	8

Pemompaan

Metode pemompaan yang efektif adalah dengan memperhatikan fluktuasi muka air tanah dan pemompaannya dilakukan secara periodik. Pembuangan dari hasil pemompaan harus melalui perlakuan khusus sebelum dibuang agar zat pencemarnya dapat diuraikan kembali secara alami. Sebagai gambaran bagaimana pengaruh pemompaan terhadap konsentrasi bahan pencemar yang ada di daerah penelitian dilakukan simulasi pembuatan sumur pompa dengan 2 skenario simulasi (Tabel 4).

Skenario 1

Pada skenario ini dibuat satu buah sumur pompa di daerah yang mengalami pencemaran. Pembuatan sumur pompa dilakukan di dekat sumber pencemaran dan sumur-sumur yang mengalami pencemaran.

Pemompaan dilakukan selama empat hari dengan debit pemompaan sebesar 8 lt/dt. Berdasarkan hasil pemodelan dengan satu sumur pompa, didapatkan bahwa dalam kurun waktu 12 tahun setelah terjadinya pencemaran atau tahun 2010 jika dilakukan pemompaan maka akan dapat mengurangi konsentrasi benzene yang tersebar

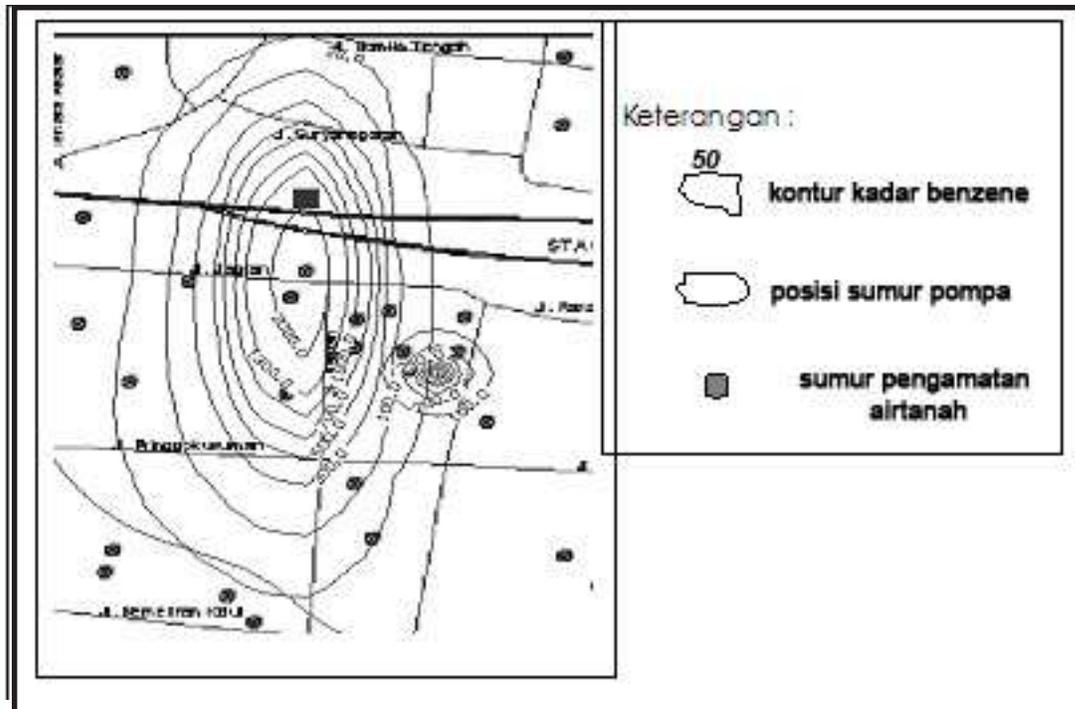
dalam airtanah dari 1-3000 mg/l menjadi 1-2000 mg/l (Gambar 4) dengan penyebaran pencemaran benzene mencapai daerah pringgokusuman. Dengan melakukan pemompaan pada satu sumur daerah yang tercemar berkurang 11,11 % dan kadar pencemaran berkurang 33,33 %.

Skenario 2

Pada skenario ini dibuat empat buah sumur pompa di daerah yang mengalami pencemaran. Pembuatan keempat sumur pompa dilakukan di didekat sumber pencemaran dan sumur-sumur yang mengalami pencemaran. Lokasi sumur dipilih dengan asumsi bahwa pemompaan pada keempat sumur tersebut dapat mengurangi dan menghambat penyebaran pencemaran. Pemompaan dilakukan selama 9 hari dengan debit pemompaan sebesar 8 lt/dt

Berdasarkan hasil pemodelan didapatkan bahwa dalam kurun waktu 12 tahun setelah terjadinya pencemaran jika dilakukan pemompaan pada empat lokasi maka akan mengurangi konsentrasi benzene dari 1-3000 mg/l menjadi 1-565 mg/l (Gambar 5). Dengan melakukan pemompaan pada empat sumur daerah yang tercemar berkurang 33,33 % dan kadar pencemaran berkurang 81,11 %.

Pengurangan konsentrasi tersebut sangat signifikan dan lebih besar jika dibandingkan pemompaan dengan satu sumur pompa saja karena debit pemompaan keempat sumur tersebut lebih besar sehingga mampu mengambil konsentrasi solar dalam jumlah cukup banyak. Akan tetapi untuk melakukan pembuatan sumur pompa harus diperhatikan kondisi airtanah sekitar karena jika



Gambar 4. Simulasi penyebaran dan konsentrasi benzene jika dilakukan pemompaan pada satu sumur pompa

debit pemompaan terlalu besar dapat mengganggu ketersediaan airtanah di daerah penelitian dan dapat menyebabkan masyarakat kekurangan air bersih. Sehingga harus dipilih pemompaan yang aman dan mampu menjaga keseimbangan airtanah di daerah pemompaan.

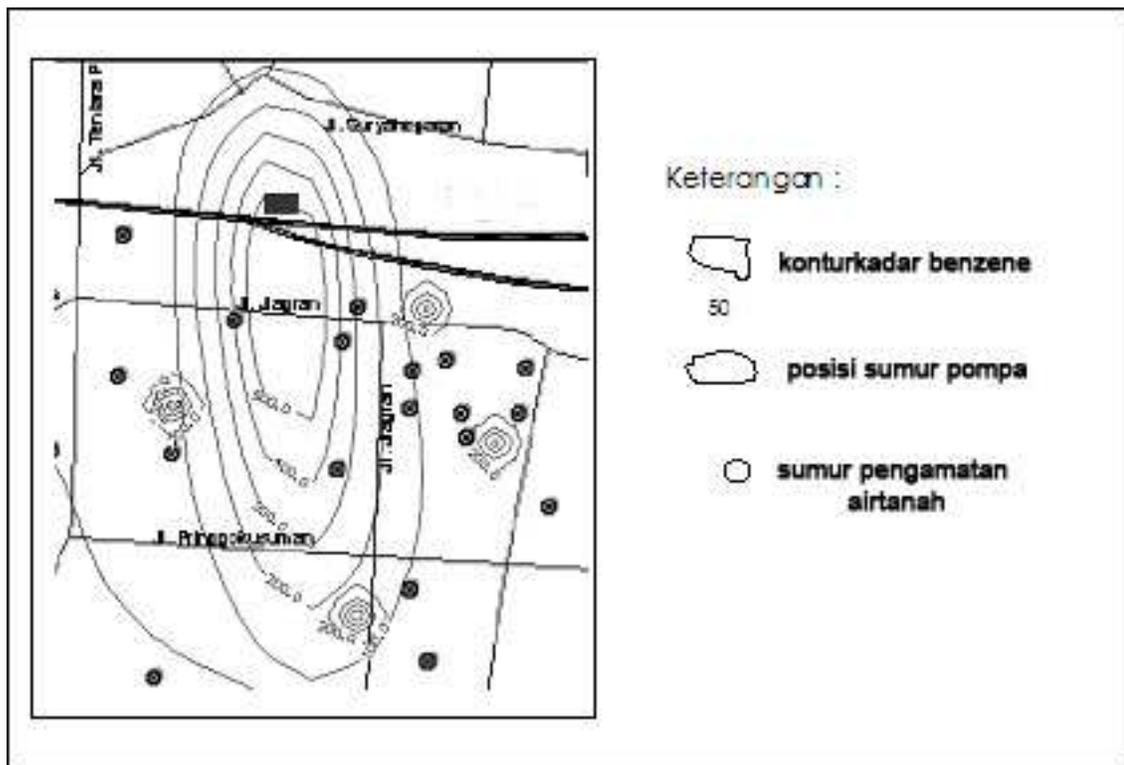
Pembuatan bangunan penahan (*physical barrier*)

Bangunan penahan dibuat untuk membendung airtanah yang telah mengalami pencemaran agar penyebarannya tidak semakin luas dan dapat dengan mudah diambil atau dinetralisir pencemarannya. Pembuatan bangunan penahan berbahan beton atau logam yang tidak berpori atau berpori sangat kecil dilakukan disekitar daerah yang tercemar dan searah

dengan aliran airtanah, sehingga diharapkan dapat melindungi airtanah disekitarnya agar tidak mengalami pencemaran. Pembuatan penahan relatif lebih sulit karena kedalaman airtanah pada suatu daerah bervariasi dan kemungkinan terjadinya kebocoran sangat besar.

Bioremediasi

Dalam penanggulangan pencemaran, beberapa mikroorganisme dapat dimanfaatkan untuk mengurangi konsentrasi bahan pencemar. Minyak disel merupakan produk hidrokarbon, sehingga untuk menurunkan konsentrasinya dibutuhkan organisme yang mampu mendegradasi hidrokarbon. Menurut Schneider & Billingsley (1990), dalam



Gambar 5. Simulasi penyebaran dan konsentrasi benzene jika dilakukan pemompaan pada empat sumur pompa

Hasan (1996), mikroorganisme yang mampu mendegradasi hidrokarbon dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu untuk mendegradasi senyawa alifatik dan senyawa aromatik (Tabel 5).

Mikroorganisme tersebut pada awal proses dimasukkan kedalam airtanah yang tercemar. Proses degradasi pada awalnya akan berjalan sangat lambat karena mikroorganisme yang dimasukkan dalam airtanah, membutuhkan waktu untuk menyesuaikan diri dengan kondisi airtanah yang tercemar. Setelah mampu menyesuaikan diri, organisme akan berkembang dengan sangat cepat karena adanya ketersediaan makanan dalam jumlah banyak. Dengan banyaknya mikroorganisme maka minyak disel dapat dengan cepat terdegradasi sehingga airtanah dapat kembali bersih dari bahan pencemar. Proses ini relatif aman karena seiring dengan peningkatan jumlah mikroorganisme, makanan yang ada (minyak disel) tidak mampu memenuhi kebutuhan mikroorganisme sehingga mikroba tersebut akan mati.

Dengan langkah-langkah tersebut diharapkan kondisi airtanah di daerah penelitian dapat kembali normal dan pencemaran dapat dihentikan agar tidak menyebar ke daerah sekitar. Jika airtanah sudah bersih, masyarakat diharapkan dapat memanfaatkan sumur-sumur tradisonalnya kembali. Dengan memanfaatkan airtanah yang sudah sehat maka masyarakat dapat lebih berhemat dan hidup lebih sehat.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Dari hasil pemodelan penyebaran pencemaran bahan bakar minyak disel pada daerah penelitian, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Sifat-sifat benzene sangat berpengaruh terhadap luas dan lebar daerah yang tercemar, waktu terjadinya dan kadar pencemaran. Sifat benzene yang mempunyai berat jenis lebih kecil dari air menyebabkan pencemaran terakumulasi pada

Tabel 5. Mikroorganisme Yang Dapat Digunakan Untuk Mengatasi Pencemaran

Alifatik	Aromatik
Acinetobacter calcoaceticus	Acineobacter
Arthrobacater simplex	Agrobacterium
Canada lypolyticum	Alcaligenes
Corynebacterium glutamicum	Phanerochaete
Cephalosporium roseum	Pseudomonas putida
Mycobacterium parafficum	Pseudomonas testosteroni
Mycobacterium smegmatis	Aspergillus
Flavobacterium	Azotobacter

Sumber : Schneider & Billingsley (1990), dalam Hasan (1996)

permukaan airtanah dan penyebarannya mengikuti pola aliran airtanah yaitu dari utara ke selatan atau barat daya.

2. Waktu tempuh partikel benzene dalam airtanah pada kondisi awal minimal 626,67 hari dan maksimum 1880 hari. Sebagian besar partikel bergerak dengan kecepatan rata-rata 1253,34 hari (3,4 tahun), waktu tempuh tersebut menunjukkan bahwa partikel benzene dalam airtanah bergerak dengan kecepatan sangat lambat.
3. Hasil pemodelan polutan minyak disel menunjukkan bahwa dari tahun ke tahun penyebarannya semakin luas. 12 tahun setelah kondisi awal diprediksikan *plume* polutan akan mencapai daerah Kemetiran. Penyebaran polutan berjalan lambat, dalam 12 tahun panjangnya menjadi 900 m atau kurang dari 1314 m, hal ini membuktikan bahwa proses pergerakan polutan tidak hanya dipengaruhi oleh kecepatan aliran dan waktu alir tetapi juga dipengaruhi proses lain yang dialami oleh benzene sewaktu berinteraksi dengan airtanah dan akuifer di daerah penelitian. Pada tahun 2010 diprediksikan kadar benzene dalam airtanah masih tinggi yaitu mencapai 3000 mg/l dan kadar minyak disel yang terdapat di dalam airtanah kurang lebih 100829,27 mg/l.

Saran

Dari hasil pemodelan penyebaran pencemaran bahan bakar minyak disel pada daerah penelitian, maka disarankan beberapa hal sebagai berikut :

1. Penyebaran polutan dipengaruhi oleh pola aliran dan bergerak dari utara ke selatan dan barat daya, sehingga perlu upaya pemantauan terhadap airtanah dibagian selatan sumber pencemaran melalui sumur-sumur tradisional maupun dengan sumur pantau agar dapat segera diketahui ada tidaknya pencemaran pada lokasi baru.
2. Akuifer daerah penelitian didominasi oleh batupasir sedang-halus dengan porositas dan permeabilitas yang baik, sehingga mampu meloloskan dan menyimpan polutan dalam jumlah banyak kedalam airtanah, sehingga perlu dilakukan pemantauan konsentrasi bahan pencemar dalam butiran-butiran pasir agar pencemaran tidak berlangsung lama.
3. Membuat dinding atau tanggul penahan yang bersifat impermeabel untuk melindungi daerah yang belum mengalami pencemaran.
4. Melakukan pemompaan dan bioremediasi agar polutan hilang dari airtanah sehingga airtanah dapat dimanfaatkan kembali untuk kebutuhan sehari-hari.
5. Melakukan upaya pemantauan terus-menerus terhadap kualitas airtanah di daerah penelitian maupun daerah lainnya terutama daerah beresiko tinggi.
6. Mengadakan sosialisasi terhadap semua lapisan masyarakat mengenai pencemaran, sehingga dapat melakukan upaya pencegahan dini untuk mengatasi pencemaran.
7. Ketegasan dari aparat pemerintah untuk melaksanakan undang-undang maupun peraturan tersebut.

DAFTAR RUJUKAN

- Bedient, P. B., Rifai, H. S., & Newell, C. J., 1999, *Ground Water Contamination, Transport and Remediation, Second Edition*, Prentice-Hall International, Singapore
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W., 1990. *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley & Sonc Inc., Singapore
- Hardjono, A., 2001, *Teknologi Minyak Bumi*, Gajah Mada University Press, Jogjakarta
- Hasan, S. E., 1996, *Geology and Hazardous Waste Management*, University of Missouri, Kansas
- Hendrayana, H., & Putra, D. P. E., 2003, *The Improvement of Yogyakarta Groundwater Basin Concept*, Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gajah Mada, Jogjakarta
- Ibrahim, Dr., H., 2001, *Pencemaran Air*, Universiti Brunei Darussalam, Brunei Darussalam
- Kemelut Pencemaran Sumur; Panas, Temu Warga dengan PT KAI, *Kedaulatan Rakyat*, 21 Maret 2003, Jogjakarta, [http.kr-online.co.id](http://kr-online.co.id)
- Putra, D. P. E., 2003, *Project Final Report, Integrated Water Resources Management in Merapi-Yogyakarta Basin, Technical Report*, Faculty of Engineering, Gajah Mada University, Jogjakarta
- Spitz, K., & Moreno, J., 1996, *A Practical Guide to Groundwaler and Solute Transport Modeling*, John Wiley & Sons Inc., Canada