

**APLIKASI MIKROSEISMIK UNTUK MEMINDAI DAN
MENGIDENTIFIKASI KEBERADAAN HIDROKARBON**
(Microseismic Application for Direct Hydrocarbon Detection and Identification)

Wahyudi

Jurusan Fisika FMIPA, Universtas Gadjah Mada,
pwahyudi2002@yahoo.com

ABSTRAK

Mikroseismik (mikrotremor) hidrokarbon adalah suatu fenomena baru dalam mendeteksi dan mengidentifikasi keberadaan hidrokarbon secara langsung. Teknologi baru yang dikembangkan berdasarkan fenomena tersebut dalam terminologi ini disebut MHDI (*Microseismic for Hydrocarbon Detection and Identification*). Teknologi ini digunakan pada eksplorasi hidrokarbon, pemantauan dan pengembangan lapangan minyak. Teknik tersebut didasarkan pada prinsip-prinsip sifat non-linear dari suatu sistem fluida dalam medium berpori. Hidrokarbon dalam sistem (medium) berpori pada batuan reservoir dapat dipikirkan sebagai deformasi karakteristik dari spektrum *noise* bumi alami dalam jangkauan frekuensi yang rendah, yaitu antara 0,2 – 6,0 Hz. Sinyal seismik frekuensi rendah ini direkam secara pasif di permukaan bumi dengan seismometer yang sangat sensitif, dan secara spektroskopi dianalisis untuk menghasilkan sebuah spektrum tertentu yang unik, yang dapat digunakan sebagai indikator keberadaan hidrokarbon secara langsung.

Kata kunci: mikroseismik, hidrokarbon

ABSTRACT

Hydrocarbon microtremor is a new phenomenon for direct hydrocarbon detection and identification. A new technology which is developed based on this phenomenon is called MHDI (*Microseismic for Hydrocarbon Detection and Identification*). The technology is applied in hydrocarbon exploration, field development and monitoring. The technique is based on the principles of non-linear behavior of fluid systems in porous media. Hydrocarbon in the pore system of reservoir rocks can be considered as a characteristic deformation of the natural earth noise spectra in the low frequency range between 0.2 and 6.0 Hz. These low frequency seismic signals are recorded passively at the surface with ultra high sensitive seismometers. The signals are spectroscopically analyzed to produce a unique spectral signature which is used as a direct hydrocarbon indicator.

Keywords: microseismic, hydrocarbon

1. PENDAHULUAN

Mikroseismik atau gempa mikro adalah gelombang seismik yang memiliki magnitudo yang relatif kecil, biasanya kurang dari 3 skala Richter. Mikroseismik dapat berasal dari bermacam-macam sumber, seperti mikro-seismik laut (*sea-microseism*) yang sumbernya dari gelombang laut, tremor vulkanik yang bersumber dari gunungapi, mikro-seismik pada zona geothermal, *background noise* dari suatu kawasan misalnya jalan raya, rel kereta api, jembatan, bangunan gedung, angin, dan berbagai sumber yang berasal dari aktivitas di permukaan maupun di bawah permukaan bumi.

Survei mikroseismik pada umumnya dilakukan untuk berbagai aplikasi, seperti untuk pemantauan aktivitas gunungapi, mendukung eksplorasi geo-thermal, mikrozonasi, penelitian geofisika lingkungan, serta aplikasi geoteknik, dan sebagainya.

Aplikasi mikroseismik dalam eksplorasi hidrokarbon belum pernah dilakukan di Indonesia. Metode baru ini merupakan pengembangan dari teknologi instrumentasi yang semula ditujukan untuk keperluan militer, yaitu berupa pengembangan *ultra high sensitivity broadband seismometer*, yang digunakan untuk mendeteksi sinyal akustik sangat lemah (mikroakustik) yang mempunyai frekuensi sangat rendah (infrasonik).

Suatu fenomena menarik telah ditemukan, yaitu adanya sinyal mikroseismik yang terdeteksi di atas suatu reservoir hidrokarbon, yang dikenal dengan nama mikrotremor hidrokarbon (Dangel et al., 2003). Sinyal ini sangat unik dan tidak ditemukan pada permukaan di atas medium yang tidak berisi hidrokarbon. Sehubungan dengan penemuan tersebut, maka dikembangkan suatu teknologi untuk mendeteksi hidrokarbon secara langsung yang dapat digunakan baik dalam eksplorasi, pengembangan lapangan, maupun dalam pemantauan (*monitoring*) lapangan hidrokarbon. Teknologi tersebut dalam

terminologi ini diberi nama MHDI (*Microseismic for Hydrocarbon Detection and Identification*).

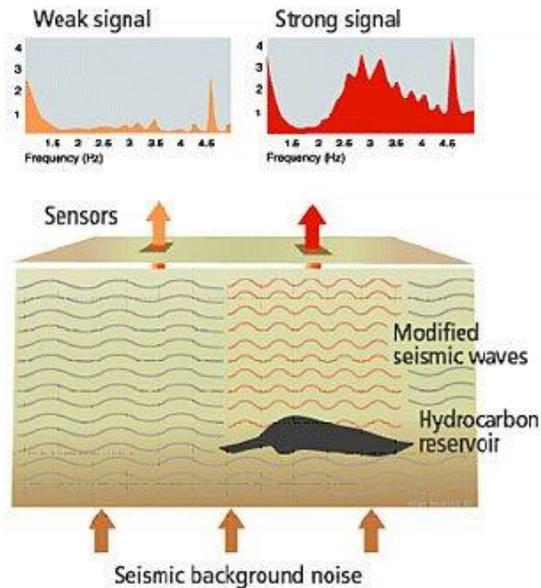
Teknik tersebut didasarkan pada prinsip-prinsip sifat non-linear dari suatu sistem fluida dalam medium berpori. Hidrokarbon sebagai suatu sistem berpori dalam batuan reservoir dapat dideteksi sebagai deformasi karakteristik dari spektrum noise bumi alami dalam jangkauan frekuensi yang rendah, yaitu antara 0,2 – 6,0 Hz. Sinyal seismik frekuensi rendah ini direkam secara pasif di permukaan bumi dengan seismometer yang sangat sensitif, dan secara spektroskopi dianalisis untuk menghasilkan sebuah spektrum tertentu yang unik, yang dapat digunakan sebagai indikator keberadaan hidrokarbon secara langsung.

Fenomena ini pertama kali ditemukan pada tahun 1997 (Dangel et al., 2003) ketika pada *top* dari sebuah reservoir minyak, spektrum noise bumi alami menunjukkan peningkatan magnitudo dalam jangkauan frekuensi antara (0,2 – 6,0) Hz (lihat Gambar 1). Peningkatan amplitudo ini dibarengi dengan kemunculan beberapa garis spektral yang merupakan karakteristik dari reservoir. Fenomena tersebut telah ditemukan pada beberapa lokasi yang berbeda, pada reservoir yang berbeda, dan pada negara yang berbeda, dengan keadaan geologi dan lingkungan yang berbeda pula.

Penjelasan tentang adanya fenomena tersebut didasarkan pada teori yang mengatakan bahwa reservoir hidrokarbon dapat dipandang sebagai suatu sistem multi-fluida dalam medium berpori yang mempunyai *transfer characteristic* gelombang akustik yang non-konvensional (*non linear*). Dengan demikian reservoir hidrokarbon merupakan konverter frekuensi dari bagian spektrum noise bumi alami yang tinggi ke arah yang lebih rendah.

Sinyal mikroseismik frekuensi rendah ini berasal dari *background noise* yang secara aktif dipancarkan oleh bumi (noise tektonik dan *background* seismoakustik). Sinyal-

sinyal tersebut secara spektroskopi dianalisis, dan dari reservoir hidrokarbon (sistem multi-fluida dalam medium berpori) menghasilkan sebuah spektrum tertentu yang unik, yang dapat digunakan sebagai indikator keberadaan hidrokarbon secara langsung (spektroskopi seismoakustik) dengan jangkauan frekuensi antara (0,2 – 6,0) Hz.



Gambar 1. Ilustrasi adanya fenomena mikrotremor hidrokarbon (Dangel et al., 2003).

Beberapa perbandingan antara teknik mendeteksi hidrokarbon secara langsung (MHDI) jika dibandingkan dengan teknik seismik eksplorasi konvensional adalah sbb (Holzner, et al. 2007):

1. Metode MHDI independen terhadap keadaan litologi, jenis batuan, dan kompleksitas struktur, sehingga dapat diterapkan pada berbagai kondisi geologi, geofisika dan lingkungan.
2. Survei MHDI akan mengidentifikasi daerah prospek, dan mendeliniasi daerah sangat prospek, sehingga posisi titik pengeboran dapat ditentukan secara tepat.
3. Dapat mengidentifikasi ketebalan lapisan hidrokarbon secara langsung pada lokasi

- yang berbeda-beda, sehingga dapat menghindari pengeboran *dryhole*.
4. Dapat digunakan untuk mengestimasi sumberdaya hidrokarbon (cadangan reservoir).
5. Dapat digunakan bersamaan dengan berbagai teknologi eksplorasi konvensional, seperti seismik 2D/3D, survei gravitasi dan magnetik, survei geologi dan geokimia permukaan, dan penginderaan jauh.
6. Dapat memfasilitasi atau membantu *management* dalam hal penentuan keputusan investasi (mereduksi risiko dan ketidakpastian).
7. MHDI dapat mengidentifikasi kandungan reservoir pada cebakan strati-grafi *multiple* yang tidak dapat dipetakan dengan seismik konvensional.
8. Dapat membantu mempersiapkan rencana pengembangan lapangan.

Adapun pada tahap produksi dan pengembangan lapangan, teknologi ini dapat mengontrol reservoir yang telah berproduksi, misalnya ketebalan lapisan hidrokarbon akan dapat diprediksi pada titik-titik yang berbeda dan pada waktu yang berbeda pula, sehingga metode ini sangat cocok dipergunakan untuk keperluan EOR.

2. KONSEP DASAR

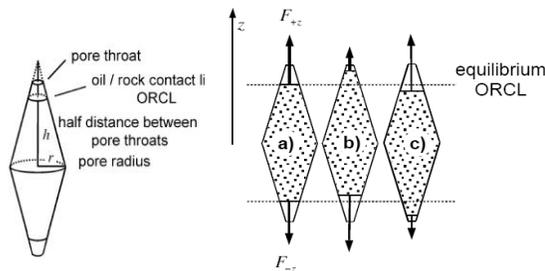
Mikrotremor hidrokarbon diyakini sebagai peristiwa osilasi harmonik dari suatu fluida hidrokarbon dalam skala pori yang terjadi di dalam reservoir, yang dipicu oleh suatu gaya luar seperti gelombang seismik mikro laut (*sea microseism*) serta gelombang seismik frekuensi rendah lainnya dari berbagai aktivitas geodinamik (Holzner, et al. 2007).

Geometri pori reservoir dimodelkan dalam bentuk *bi-conical* sederhana sebagai representasi dari model linear yang menghasilkan osilasi harmonik frekuensi rendah (lihat Gambar 2). Pengambilan model geometri *bi-conical* tersebut mempunyai keuntungan dalam mendefinisikan konstante

pegas linear yang independen terhadap dislokasi fluida di sepanjang sumbu z (Holzner, et al. 2007).

Pada Gambar 2 terlihat bahwa batas permukaan fluida akan membentuk ORCL (Oil-Rock Contact Line), yaitu kolom kontak antara minyak dengan batuan, seperti pori-pori yang basah karena air dimana akan terjadi gaya kapiler.

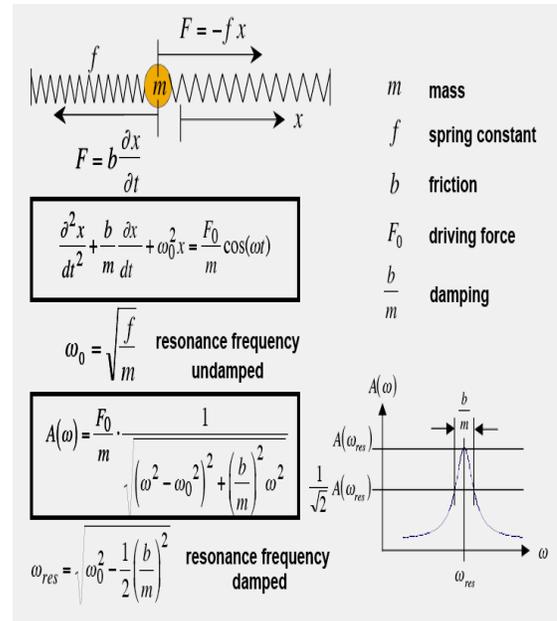
- Cairan dalam keadaan setimbang: gaya-gaya kapiler F_{+z} pada arah z positif dan F_{-z} pada arah z negatif dalam keadaan setimbang satu dengan lainnya.
- Keadaan setelah cairan mengalami satu simpangan kecil pada arah z positif F_{+z} berkurang dan F_{-z} bertambah, relatif terhadap keadaan setimbangnya. Gaya tersimpan yang dihasilkan akan menggerakkan cairan kembali ke posisi z negatif ke arah posisi setimbangnya.
- Sama dengan b). tetapi untuk dislokasi ke arah z negatif.



Gambar 2. Representasi skematik dari suatu bentuk geometri pori-pori *bi-conical* sederhana yang menghasilkan osilasi frekuensi rendah di sepanjang sumbu z dari fluida hidrokarbon yang mengisi pori-pori reservoir (Holzner, et al. 2007).

Dalam keadaan setimbang, gaya kapiler yang proporsional dengan panjang kolom kontak antara hidrokarbon dengan batuan (ORCL) akan setimbang satu dengan yang lain. Untuk suatu simpangan hidrokarbon yang kecil, panjang ORCL akan

selalu berubah sedemikian rupa berkaitan dengan gaya kapiler yang terjadi, sehingga akan terjadi osilasi di dalam pori-pori reservoir. Gambar 3 menjelaskan osilasi satu dimensi yang terjadi di dalam pori di sepanjang sumbu x dengan persamaan diferensial orde dua beserta fungsi respon resonansinya (Holzner, et al. 2007).



Gambar 3. Penjelasan umum dari osilasi satu dimensi yang terjadi di dalam pori di sepanjang sumbu x dengan persamaan diferensial orde dua beserta fungsi respon resonansinya (Holzner, et al. 2007).

Dengan mengabaikan gravitasi, yang akan menggeser posisi kesetimbangan, maka frekuensi osilasi yang dihasilkan dari suatu model osilator satu dimensi dapat diestimasi. Bila konstante pegas adalah:

$$f = \frac{\partial F_z}{\partial z} = \gamma \frac{2\pi r}{h} \quad (1)$$

dan massa :

$$m = \frac{2}{3} r^2 \pi h \rho_L \quad (2)$$

maka akan menghasilkan frekuensi resonansi sebesar:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{f}{m}} = \frac{1}{2\pi h} \sqrt{\frac{6\gamma}{r\rho_L}} \quad (3)$$

Besarnya frekuensi $\nu=3$ Hz berse-suaian dengan nilai-nilai parameter yang tertera pada Tabel 1. Demikian pula nilai kecepatan gerakan tanah yang dihasilkan sekitar 10^{-6} m/s yang diukur di permukaan merepresentasikan nilai yang dihasilkan oleh sinyal mikrotremor dari pori-pori suatu reservoir yang tebalnya 20 m dengan kedalaman 1000 m dan porositas 0,2. Adapun spektrum amplitudo yang berse-suaian dengan nilai parameter yang tertera pada Tabel 1 dapat dilihat pada Gambar 4.

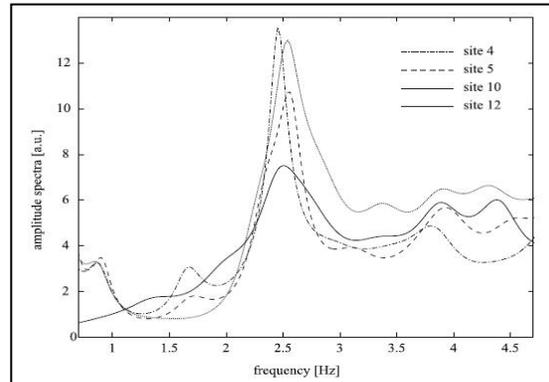
3. AKUISISI DAN PENGOLAHAN DATA

Kegiatan pengambilan data mikro-seismik di lapangan dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu:

- a. Tahap persiapan yang meliputi per-siapan peralatan utama dan pendukung serta kalibrasi.
- b. Tahap *Reconnaissance* untuk menentu-kan titik-titik ukur di lapangan.
- c. Pengambilan data mikro-seismik.

Tabel 1. Nilai parameter untuk model pori *bi-conical* sederhana yang berse-suaian dengan frekuensi osilasi 3 Hz (Holzner, et al. 2007).

No	Parameter	Nilai
1.	Tegangan permu-kaan minyak	$\gamma = 10^{-3}$ N/m
2.	Densitas minyak	$\rho_L = 800$ kg/m ³
3.	Radius pori-pori	$r = 10^{-3}$ m
4.	Setengah panjang kolom pori	$h = 5.10^{-3}$ m



Gambar 4. Spektrum mikrotremor hidrokarbon yang diukur di atas suatu reservoir hidrokarbon (Dangel et al., 2003).

Peralatan utama yang digunakan dalam pengambilan data mikro-seismik di lapangan terdiri sensor seismik *broad-band* dengan sensitivitas minimal 2000 V/m/s, datalogger 24 bit, serta peralatan pendukung seperti GPS, media penyimpanan data, dan komputer. Adapun durasi peng-ukuran direkomendasikan antara 40 menit hingga 48 jam, tergantung dari kondisi *noise* di sekitar titik amat, sedangkan frekuensi pencuplikan direkomendasikan 100 Hz. Contoh pemasangan seismometer dapat dilihat pada Gambar 5.

Salah satu tujuan yang akan dicapai dalam pemrosesan data mikro-seismik ini adalah memetakan anomali mikro-seis-mik, yaitu spektrum mikro-seismik dengan energi dalam rentang frekuensi hidro-karbon (antara 0,2 - 6,0 Hz).

Untuk mencapai tujuan tersebut, maka sebelumnya harus dilakukan editing data untuk menghilangkan sinyal yang berupa *event-event noise* yang masuk ke dalam data mikro-seismik. *Event noise* lokal ini biasanya disebabkan oleh akti-fitas manusia, kendaraan, mesin, angin, serta aktivitas lainnya. Pemisahan *event noise* ini dapat dilakukan secara manual, maupun otomatis. Untuk pemisahan secara otomatis, biasanya digunakan algoritma STALTA (*Short-Time Average per Long-Time Ave-rage*).



Gambar 5. Instalasi seismometer *broadband* di lapangan.

Setelah pemisahan *event-event noise*, data mikroseismik kemudian dikoreksi dengan garis dasar (*base-line correction*), dengan cara dikurangkan dengan nilai rata-rata (*mean*) untuk seluruh panjang sinyal. Koreksi *baseline* dapat juga dilakukan dengan menggunakan *high pass filter*, sehingga efek frekuensi rendahnya akan hilang. Setelah dilakukan pemisahan *event-event noise* dan koreksi *baseline*, tahapan selanjutnya adalah pembersihan sinyal dari efek frekuensi di luar frekuensi *interest*. Dalam hal ini dilakukan *band-pass filtering* dengan frekuensi band antara 0,5 s.d. 8,0 hertz.

Tahapan berikutnya adalah perhitungan atribut seismik untuk keperluan pemetaan potensi hidrokarbon. Ada 3 atribut seismik yang akan dihitung, yaitu: (1) nilai energi spektrum pada *range* frekuensi antara 1,7 sampai dengan 3,7 Hz, (2) nilai *dip angle* dari sinyal mikroseismik, dan (3) nilai linearitas dari sinyal.

Nilai energi spektrum dapat dihitung dengan melakukan analisis spektrum, misal FFT (*Fast Fourier Transform*), atau MESA (*Maximum Entrophy Spectral Ana-lysis*), atau dengan algoritma lainnya. Adapun untuk menentukan sudut dip (*dip angle*) dapat dilakukan dengan cara melakukan analisis

polarisasi sinyal, yaitu dengan memecahkan secara kuadrat terkecil matriks kovarian 3 komponen sinyal mikroseismik, dan menghitung *eigen vector* dan *eigen value* dari matriks kovarian pada *window* yang diinginkan (Jurkevics, 1988).

Secara sistematis, langkah peng-olahan data mikroseismik dapat digam-barkan melalui diagram alir (Gambar 6). Sedangkan sebagai hasil akhir yang akan diperoleh dari tahapan ini adalah sebuah peta potensi kandungan hidrokarbon (*Hydrocarbon Potential Map*). Peta ini menunjukkan seberapa besar potensi hidrokarbon di suatu area berdasarkan besar-kecilnya energi spektrum mikro-seismik di daerah tersebut.

Sebagai ilustrasi disajikan sebuah peta potensi hidrokarbon dari sebuah lapangan minyak di Brazil. Pengukuran mikro-seismik di lapangan tersebut dilakukan pada areal seluas 200 km², dengan jumlah titik pengukuran sebanyak 500 titik (Saenger et al., 2007). Dari pengukuran tersebut menghasilkan peta potensi hidrokarbon seperti terlihat pada Gb. 7.



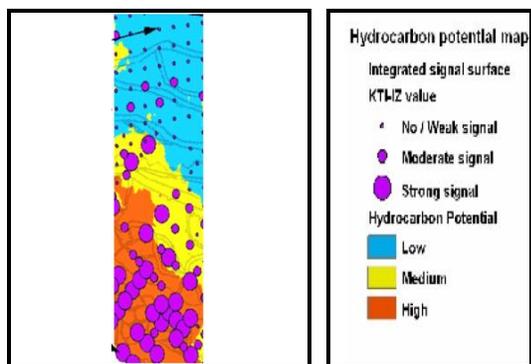
Gambar 6. Diagram alir pengolahan data mikroseismik.

Pada Gambar 7 terlihat bahwa area survei

dibagi menjadi 3 zona potensi, yaitu *high potential hydrocarbon* (warna orange), *medium potential hydrocarbon* (warna kuning) dan *low potential hydro-carbon* (warna biru muda). Ketiga zona tersebut dibedakan berdasarkan besar kecilnya anomali mikroseismik hidro-karbon, yang digambarkan dengan besar-kecilnya radius lingkaran yang berwarna ungu. Semakin besar lingkaran menunjuk-kan semakin tinggi amplitudo spektrum mikroseismik hidrokarbon.

Apabila distribusi titik pengukuran dapat disajikan dalam bentuk grid yang teratur dengan jumlah titik yang men-cukupi, maka penggambaran berupa lingkaran dapat digantikan dengan bentuk kontur, yang sekaligus akan berlaku sebagai peta potensi hidrokarbon di daerah tersebut.

Dari contoh di atas terlihat bahwa pembagian zona dilakukan secara statistik dengan melihat distribusi dan besar-kecilnya lingkaran anomali mikroseismik.



Gambar 7. Sebuah peta potensi hidrokarbon di lapangan minyak di Brazil. Semakin besar lingkaran berarti semakin besar amplitudo anomali hidrokarbon, yang berarti semakin tinggi potensi hidrokarbonnya (Saenger et al., 2007).

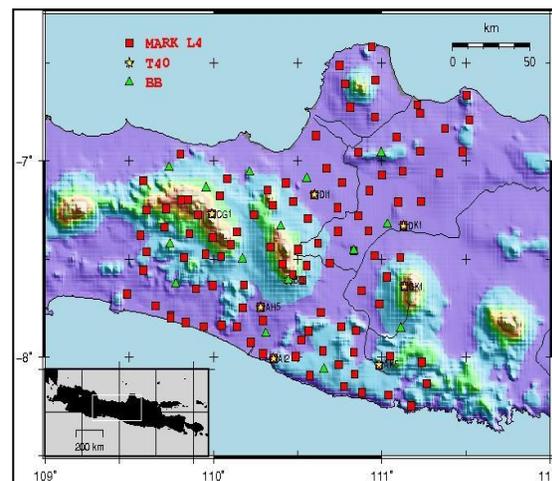
Dengan kenyataan tersebut, maka dalam hal ini jumlah dan distribusi titik pengukuran menjadi salah satu faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam melakukan

survei dengan metode ini.

Dari contoh kasus di atas, maka disarankan agar survei mikroseismik dilaku-kan dengan densitas rata-rata 2 sampai dengan 3 titik pengukuran tiap km² atau dengan cara *gridding* dengan *spacing* antara 500m – 750m.

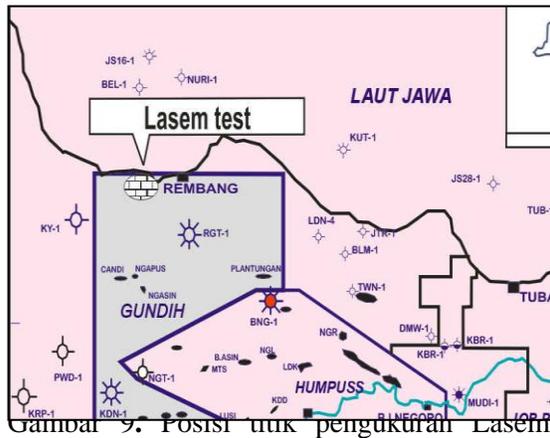
3. STUDI KASUS

Untuk membuktikan adanya feno-mena mikrotremor hidrokarbon ini, maka telah dilakukan studi kasus pada beberapa data seismik yang direkam oleh suatu proyek penelitian tomografi seismik di Jawa Tengah (MERAMEX), suatu proyek kerjasama riset antara pemerintah Indonesia dengan Jerman. Dalam proyek ini telah dipasang 120 seismometer di Jawa Tengah dan beberapa diantaranya terdapat di daerah prospek minyak bumi, yaitu di daerah Lasem dan Kendal (lihat Gambar 8).

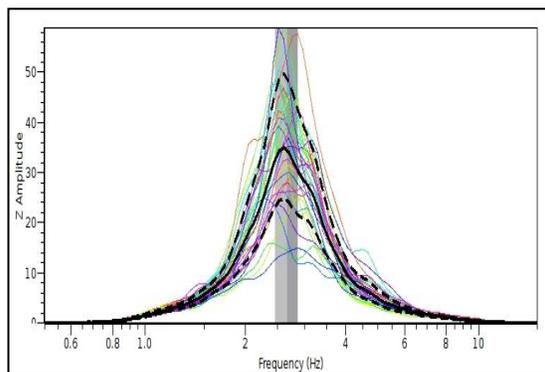


Gambar 8. Stasiun-stasiun seismik yang direkam oleh Proyek MERAMEX.

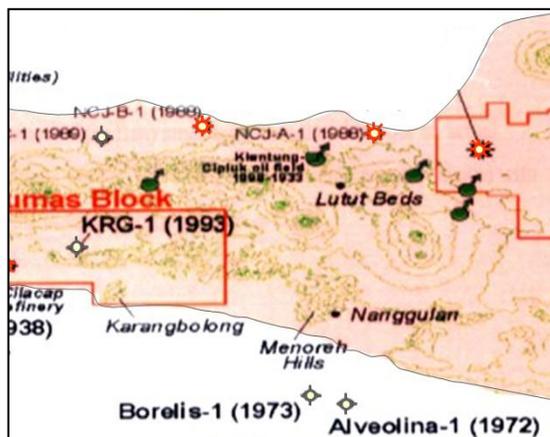
Spektrum amplitudo hasil test terhadap data seismik yang direkam di daerah prospek Lasem dan Kendal dapat dilihat pada Gambar 10 dan 12. Adapun Gambar 9 dan 11 menunjukkan posisi Lasem Test dan Kendal Test.



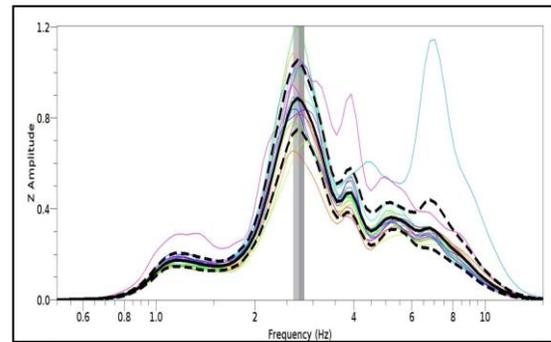
Gambar 9. Posisi titik pengukuran Lasem Test.



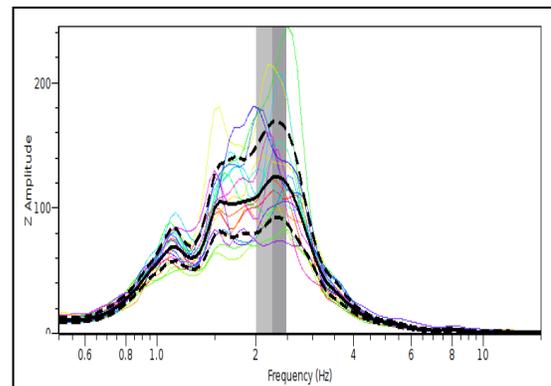
Gambar 10. Spektrum amplitudo dari data seismik Lasem Test, yang menunjukkan adanya anomali yang tinggi pada frekuensi di sekitar 3 Hz.



Gambar 11. Posisi titik pengukuran Kendal Test.



Gambar 12. Spektrum amplitudo dari data seismik Kendal Test, yang menunjukkan adanya anomali yang tinggi pada frekuensi di sekitar 3 Hz.



Gambar 13. Spektrum amplitudo dari data seismik Lapangan Wunut (Sidoarjo), yang menunjukkan adanya anomali tinggi pada frekuensi di sekitar 2 Hz, yang mengindikasikan adanya gas hidrokarbon

Adapun sebuah test telah dilakukan terhadap data seismik yang direkam di lapangan Wunut (Sidoarjo, Jawa Timur), dan menunjukkan adanya anomali positif di sekitar frekuensi 2 Hz, yang mengindikasikan adanya gas hidrokarbon.

4. KESIMPULAN

- Mikroseismik dapat diaplikasikan untuk mengidentifikasi keberadaan dan penyebaran hidrokarbon secara langsung.
- Metode MHDI sebagai metode baru sangat bermanfaat di samping untuk mendukung eksplorasi hidrokarbon, juga bermanfaat dalam pengembangan dan *monitoring* lapangan hidrokarbon.
- Metode MHDI sangat bermanfaat untuk mereduksi biaya produksi, dan mengurangi risiko *dry-hole*.
- Metode MHDI ramah lingkungan, karena tidak menggunakan sumber getaran aktif (dinamit, *air gun*) seperti yang digunakan pada metode seismik eksplorasi konvensional.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih atas dukungan data dari Proyek MERAMEX sehingga test terhadap metode ini dapat dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Dangel, S., M. E. Schaepman, E. P. Stoll, R. Carniel, O. Barzandji, E. D. Rode, and J. M. Singer, 2003, Phenomenology of tremor-like signals observed over hydro-carbon reservoirs: *Journal of Volcano-logy and Geothermal Research*, 135–158.
- Holzner, R., P. Eschle, H. Zuercher, M. Lambert, R. Graf, S. Dangel, and P. F. Meier, 2007, Applying microtremor analysis to identify hydrocarbon reservoirs: *First Break*, 23, 41–49.
- Jurkevics, A., 1988, Polarization analysis of three-component array data: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78, 1725–1743.
- Saenger E.H., A. Torres, S. Rentsch, M. Lambert, S. M. Schmalholz, Mendez-Hernandez, 2007. A hydrocarbon microtremor survey over a gas field: Identification of seismic attributes, *SEG San Antonio Fall Meeting*, 2007.

