

# Transformasi Data *Vertical Seismic Profile* (VSP) menjadi Data *Cross-well* dengan Seismik Interferometri

Jienicha Santa Dwanda<sup>a</sup>, Bagus Endar B. Nurhandoko<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,  
Institut Teknologi Bandung,  
Jalan Ganesha 10, Bandung, 40132, Jawa Barat, Indonesia  
[jienichasanta@gmail.com](mailto:jienichasanta@gmail.com)

## Abstrak

Seismik interferometri secara sederhana adalah studi mengenai interferensi antara sinyal seismik yang bertujuan untuk mendapatkan informasi dari perbedaan diantara pasangan sinyal tersebut. Seismik Interferometri pertama kali diperkenalkan oleh Claerbout pada 1968, Claerbout menunjukkan bahwa respon reflektansi dari lapisan horizontal dapat disintesis dari respon transmisi. Berdasarkan sumbernya, metode seismik interferometri dapat dibedakan menjadi seismik interferometri sumber terkontrol dan seismik interferometri pasif. Seismik interferometri membuat salah satu receiver dapat dianggap sebagai sumber, meskipun tidak ada sumber fisik, sehingga receiver ini disebut juga sebagai sumber virtual (*virtual source*). Kelebihan metode seismik interferometri ini adalah dapat menggunakan sumber seismik alami dengan frekuensi rendah dibandingkan dengan metode konvensional yang mengharuskan penggunaan sumber seismik aktif yang lebih memakan biaya. Pada penulisan tugas akhir ini akan dibahas mengenai konsep dan prinsip - prinsip dasar interferometri serta aplikasi dan pemanfaatan dari seismik interferometri untuk mentransformasi data VSP (*Vertical Seismic Profile*) menjadi data *Xwell* (*Cross Well*). Data *crosswell* disintesis dengan melakukan korelasi silang antara respon set geophone pada dua buah sumur dengan sumber berada di permukaan dan respon masing – masing set geophone telah di normalisasi dan difilter terlebih dahulu. Hasil korelasi silang yang di dapatkan tidak persis sama dengan respon asli, yaitu respon pada geophone di salah satu sumur dimana sumber berada di sumur lainnya, namun dari perbandingan hasil korelasi silang dan respon asli dapat dilihat beberapa kemiripan sehingga dapat disimpulkan bahwa metode ini mungkin digunakan sebagai metode lain untuk mensintesis data *crosswell* tanpa harus menggunakan sumber di sumur.

*Keywords: Gelombang seismik, interferometri, korelasi silang, redatuming*

## PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, metode pemulihan fungsi *Green* dengan menggunakan operasi korelasi silang telah memberikan banyak manfaat dalam seismologi baik dalam bidang eksplorasi maupun monitoring. Dalam seismologi metode ini sering juga disebut seismik interferometri. Seismik interferometri adalah bidang baru yang menarik dalam geofisika yang memberikan pandangan baru dalam usaha interpretasi struktur lapisan bawah permukaan bumi. Seismik interferometri merupakan sebuah teknik dimana sebuah gelombang datang yang merambat diantara dua receiver di korelasi silang dengan bidang gelombang acak (*random*). Korelasi silang dari respon seismik dapat membangun respon impuls atau fungsi *Green* diantara dua sensor (Campillo dan Paul, 2003). Seismik interferometri membuat salah satu receiver dapat dianggap sebagai sumber, meskipun tidak ada sumber fisik, sehingga receiver ini disebut juga sebagai sumber virtual (*virtual source*) (Bakulin dan Calvert, 2006). Peristiwa ini disebut juga reposisi atau *redatuming*. Dalam bidang eksplorasi geofisika *redatum* merupakan proses membawa sumber dan/atau receiver dari level akuisisi ke level kedalaman yang berbeda dengan menggunakan operator ekstrapolasi berdasarkan model kecepatan makro (Berryhill, 1984). Banyak studi yang dilakukan mengenai seismik interferometri dilihat dari fakta bahwa

metode seismik interferometri ini dapat menggunakan sumber seismik alami dengan frekuensi rendah (*passive seismic*) dibandingkan dengan metode konvensional yang mengharuskan penggunaan sumber seismik aktif yang lebih memakan biaya. Salah satu alasan metode ini menarik adalah fakta bahwa respon seismik dapat diperoleh dari data pengukuran lapangan dengan cara yang sederhana. Seismik alami atau seismik pasif merupakan metode geofisika terbaru yang banyak dikembangkan saat ini. Seismik pasif adalah getaran tanah dengan amplitudo mikrometer yang dapat ditimbulkan oleh peristiwa alam ataupun buatan, seperti angin, gelombang laut atau getaran kendaraan yang bisa menggambarkan kondisi geologi suatu wilayah dekat permukaan (Tokimatsu, 2004). Penggunaan seismik pasif telah banyak dimanfaatkan dalam bidang geofisika, diantaranya adalah : untuk menyelesaikan inversi kecepatan di skala geoteknik (Robert, 2004), analisis anomali frekuensi rendah pada survey lapangan gas (Saenger, 2009), untuk monitoring lokalisasi patahan bertingkat (Poliannikov, 2011), serta dapat juga digunakan untuk tomografi untuk monitoring gua pada tambang bawah tanah (*underground mine*) (Nuhandoko, 2015).

Dewasa ini banyak perkembangan survey geofisika yang dilakukan dengan menggunakan seismik interferometri. Beberapa aplikasinya diantaranya adalah untuk merubah data VSP (*vertical seismic profile*) menjadi SWP, SSP, atau Xwell. Aplikasi ini kemudian dikembangkan dalam beberapa penelitian, diantaranya adalah untuk survey data sumur/*crosswell* tanpa menggunakan sumber pada sumur (*borehole*) (Minato et al., 2007) atau untuk menjadi profil refleksi sumur tunggal untuk meningkatkan delineasi garam (Lu et al., 2008). Interferometri seismik juga dapat digunakan untuk merubah data multipel pada VSP menjadi data primer untuk memperluas cakupan area (Yu dan Schuster, 2006), serta digunakan untuk merubah multipel permukaan menjadi primer permukaan pada posisi *missing traces* (Wang et al., 2009).

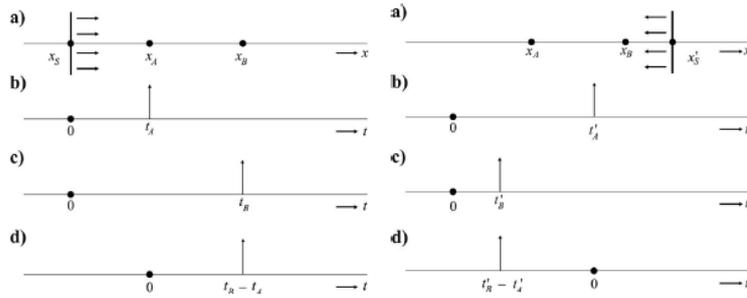
Data VSP (*vertical seismic profile*) merupakan data yang didapat dengan memancarkan tembakan (*shot*) di atau dekat permukaan bebas dan direkam oleh *receiver* di dekat sumur, dengan sumur dapat berbentuk vertikal, horizontal, atau diagonal. Data SWP (*Single Well Profile*) adalah data yang didapatkan dengan menempatkan *shot* dan *receiver* sama-sama di sumur. Data SSP (*Surface Seismic Profile*) merupakan data yang didapatkan dengan menempatkan masing-masing *shots* dan *receiver* pada permukaan atau dekat permukaan. Data Xwell (*crosswell*) adalah data yang dikumpulkan dengan menembakkan *shots* sepanjang sumur dan merekam getaran seismik yang dihasilkan oleh penerima di sumur lainnya yang berdekatan. Pada tugas akhir ini akan dipaparkan mengenai seismik interferometri, dari mulai teori, penurunan persamaan, serta aplikasinya yaitu transformasi data VSP (*vertical seismic profile*). Studi mengenai seismik interferometri ini sedang ramai dilakukan oleh banyak ilmuwan dibidang eksplorasi geofisika karena manfaatnya yang banyak dan keuntungan utamanya yang tidak bisa memanfaatkan *noise* dan sinyal *transient*.

## SEISMIK INTERFEROMETRI

Kata interferometri secara umum merujuk pada studi tentang fenomena interferensi antar pasangan gelombang yang bertujuan untuk mendapatkan informasi dari perbedaan diantara pasangan gelombang tersebut. Seismik interferometri secara sederhana adalah studi mengenai interferensi antara sinyal seismik. Seismik interferometri merupakan prinsip untuk menimbulkan gelombang seismik baru sebagai respon dari sumber yang sebenarnya (*virtual source*) dengan menggunakan operasi korelasi silang pada lokasi penerima (*receiver*) yang berbeda. Dalam metode seismik interferometri pasif tidak perlu menjumlahkan keseluruhan respon korelasi karena respon yang terkorelasi secara bersamaan akan bertindak seperti sumber yang tidak terkorelasi (Wapenaar, 2010). Pada kebanyakan kasus, respon hasil korelasi silang antara dua *receiver* (dan dijumlahkan dengan keseluruhan sumber lain) dapat diinterpretasikan sebagai respon yang diukur pada salah satu *receiver* seolah-olah sumbernya adalah *receiver* yang lain. Karena respon tersebut sama dengan fungsi Green yang dikonvolusikan dengan *wavelet*, maka interferometri seismik juga disebut pemulihan fungsi Green (*Green's function retrieval*).

### Seismik Interferometri Gelombang Langsung

Seismik interferometri melibatkan korelasi silang antara respon yang diterima oleh minimal dua *receiver*. Tinjau penjalaran gelombang langsung 1-D pada ilustrasi berikut:



Gambar 1. Ilustrasi penjalaran gelombang 1-D (a) gelombang menjalar sepanjang sumbu x dari sumber  $x_s$  (b) respon gelombang yang diterima oleh *receiver* pada  $x_A$  (c) respon gelombang yang diterima *receiver*  $x_B$  (d) respon korelasi silang antara *receiver*  $x_A$  dan  $x_B$

Gambar 1 (a) menunjukkan ilustrasi sebuah gelombang yang dipancarkan oleh sumber di  $x = x_s$  pada  $t = t_0$  menjalar sepanjang sumbu-x. Dengan asumsi bahwa kecepatan perambatan gelombang  $c$  adalah konstan, dan medium *lossless*. Gambar (b) dan (c) menunjukkan respon yang diterima oleh *receiver* pada  $x = x_A$  dan  $x = x_B$ . Respon pada  $x_A$  dinyatakan sebagai  $G(x_A, x_s, t)$ , dimana  $G$  menandakan fungsi Green. Pada persamaan ini fungsi Green mengandung impuls pada  $t_A = (x_A - x_s)/c$  sehingga

$$G(x_A, x_s, t) = \delta(t - t_A) \tag{3.1}$$

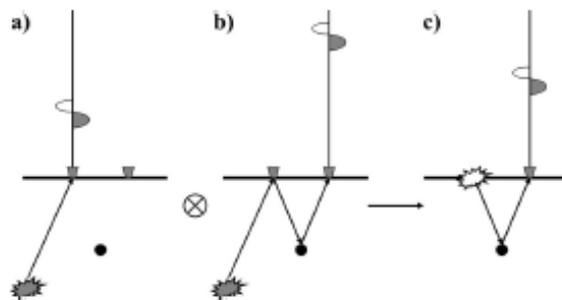
Begitu pula respon yang diterima pada *receiver*  $x_B$  dapat ditulis sebagai

$$G(x_B, x_s, t) = \delta(t - t_B) \text{ dengan } t_B = (x_B - x_s)/c \tag{3.1}$$

Waktu tempuh sepanjang jalur tersebut dapat dihilangkan dengan hanya menyisakan jarak dari  $x_A$  ke  $x_B$ , sehingga respon korelasi antara (b) dan (c) adalah impuls pada  $t_B - t_A$  (d). Impuls tersebut dapat diinterpretasikan sebagai respon dari sumber yang berasal dari  $x_A$  yang diamati oleh stasiun di  $x_B$ , dengan fungsi Green  $G(x_B, x_A, t)$ .

### Seismik Interferometri Gelombang Pantul

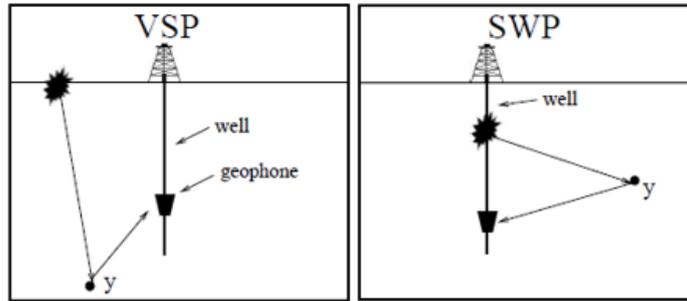
Prinsip dasar interferometri gelombang pantul dapat dijelaskan dengan ilustrasi berikut :



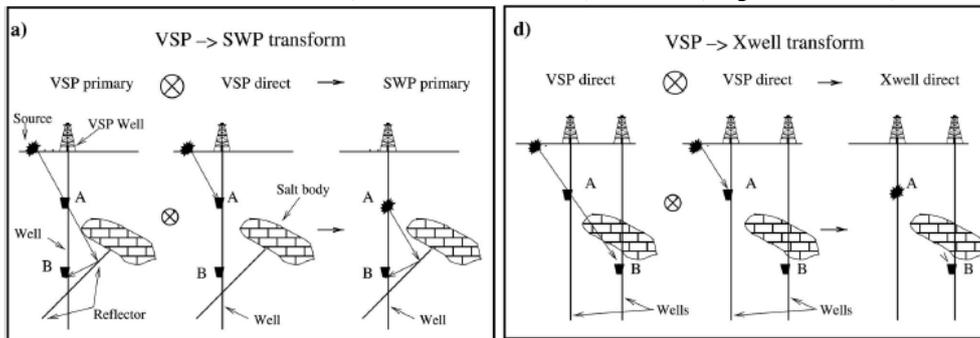
Gambar 2. ilustrasi interferometri gelombang pantul (Schuster, 2009)

Gambar 2. (a) menunjukkan sumber dibawah permukaan yang memancarkan gelombang transient ke permukaan dan diterima oleh *geophone*. Gambar (b) menunjukkan bagaimana gelombang direfleksikan ke bawah oleh batas bidang permukaan, yang kemudian direfleksikan kembali ke arah atas oleh pemantul (*scatterer*) di bawah permukaan dan kemudian diterima oleh *geophone* kedua di permukaan. Gelombang tersebut mengandung *wavelet*, yang mana mengalami perlambatan terkait dengan perambatan sepanjang jalur tambahan dari *receiver* 1 lewat pemantul ke *receiver* 2. Penjalaran gelombang pada gambar 2 (a) dan (b) memiliki kesamaan jalur dari bawah permukaan ke *receiver*. Dengan melakukan operasi korelasi silang antara kedua gelombang tersebut, jalur perambatan yang sama akan dihilangkan sehingga hasil korelasi dapat diinterpretasikan sebagai refleksi dari sumber yang terletak pada *receiver* 1, ditunjukkan oleh gambar 2 (c). Salah satu kegunaan dari seismik interferometri adalah reposisi atau *redatum* suatu sumber atau penerima (*receiver*) gelombang seismik dari suatu posisi atau level kedalaman tertentu ke level yang berbeda. Prinsip

ini kemudian dimanfaatkan untuk mereposisi VSP (*vertical seismic profile*) agar bisa memberikan informasi SWP (*single well profile*). Manfaat dari reposisi atau *redatuming* sumber VSP diantaranya adalah untuk mendapatkan resolusi citra yang lebih baik karena sumber VSP direposisi ke kedalaman yang lebih dekat dengan target. Reposisi ke level yang lebih dalam akan menghindari ketidakkfokus (*defocusing*) error karena kesalahan estimasi kecepatan migrasi tekanan total (*overburden's migration velocity*).



Gambar 3. Ilustrasi VSP (Vertical Seismic Profile) dan SWP (Single Well Profile)



Gambar 4. Ilustrasi transformasi data VSP menjadi data SWP dan crosswell

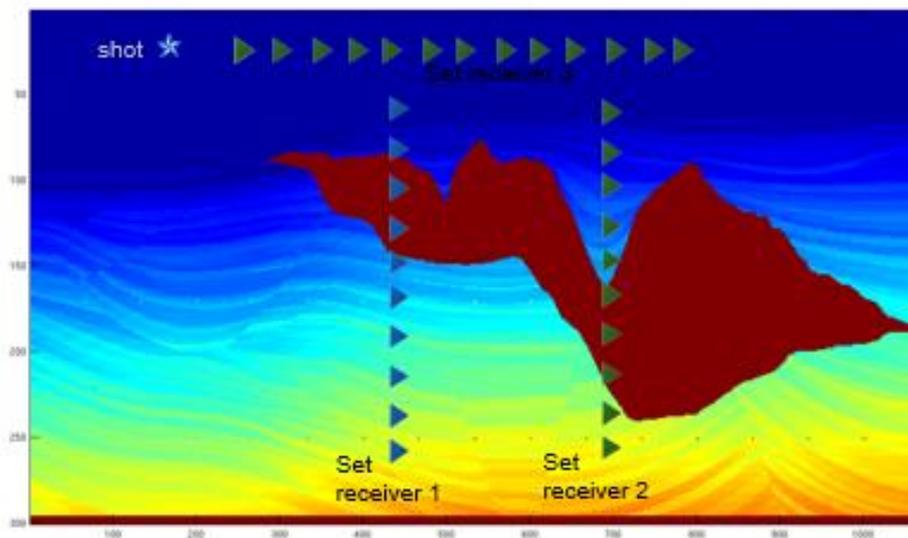
### PENGOLAHAN DATA

Prosedure pembuatan data rekaman menjadi data *crosswell* dari data VSP (*Vertical Seismic point*) dapat dilihat pada gambar . Keseluruhan pengolahan data tersebut dilakukan dengan menggunakan *software* Matlab sebagai *tools* yang membantu pengolahan data terutama dalam hal korelasi silang. Pertama data mentah akan di transformasi Fourier dengan menggunakan fungsi FFT pada Matlab untuk merubah domain data yang asalnya adalah domain waktu menjadi domain frekuensi. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui informasi tentang adanya frekuensi tertentu pada data. Selanjutnya data yang telah di FFT dan telah dilakukan koreksi sinyal untuk menghilangkan sinyal gelombang yang tidak diinginkan di IFFT atau *inverse fast fourier transform*. Hal ini dilakukan untuk mengembalikan sinyal yang telah dirubah ke domain frekuensi menjadi sinyal dalam domain waktu. Kemudian pada sinyal akan dilakukan koreksi amplitudo dari hasil IFFT tersebut dengan memanfaatkan fungsi *Automatic Gain Control (AGC)* yang bertujuan untuk mengembalikan harga amplitudo gelombang seismik yang mengalami pelemahan akibat atenuasi atau divergensi gelombang. Langkah terakhir dari proses pengolahan data ini adalah korelasi silang antar set *receiver* untuk mendapatkan data *crosswell*. Korelasi silang dilakukan antara masing-masing *geophone* pada set *receiver* 1 dan set *receiver* 2 yang telah di AGC sebelumnya. Korelasi silang dilakukan dengan menggunakan fungsi *xcorr* yang terdapat pada *software* Matlab.



Gambar 5. Alur pengolahan data

**Geometri Akusisi**



Gambar 6. Model sintetik yang digunakan dalam pengolahan data

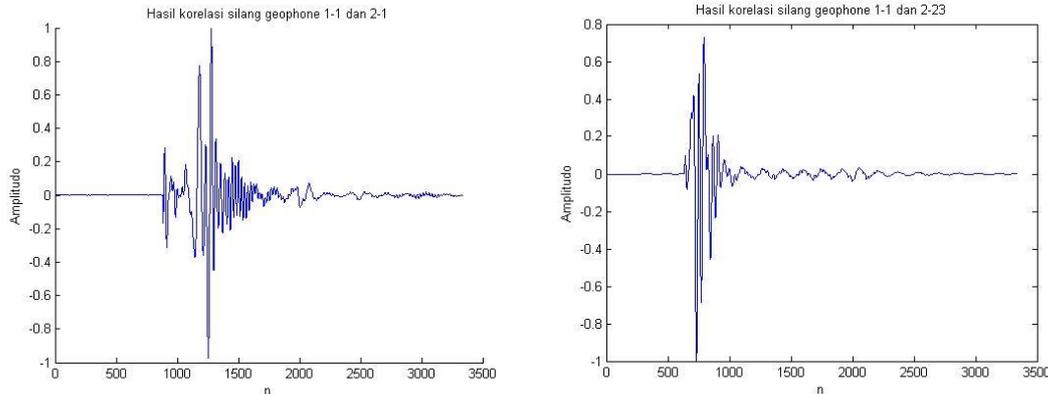
Data yang digunakan sebagai data VSP (*Vertical Seismic point*) merupakan data sumur sintetik yang dibuat berdasarkan model kecepatan *Sigsbee*. Model kecepatan *Sigsbee* merupakan data model geologi sintetik yang didasarkan pada lereng/tebing gunung curam pada perairan dalam teluk Meksiko. *Geophone* pada set *receiver 1* dan *2* menerima sinyal yang bersumber dari shot atau set *receiver 3*, respon pada masing – masing *geophone* pada set *receiver 1* dan *2* kemudian saling di korelasi silang. Hasil korelasi silang ini kemudian akan dibandingkan dengan respon data crosswell asli yaitu respon sinyal yang diterima *geophone* pada set *receiver 2* dengan sumber berada pada set *receiver 1*.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

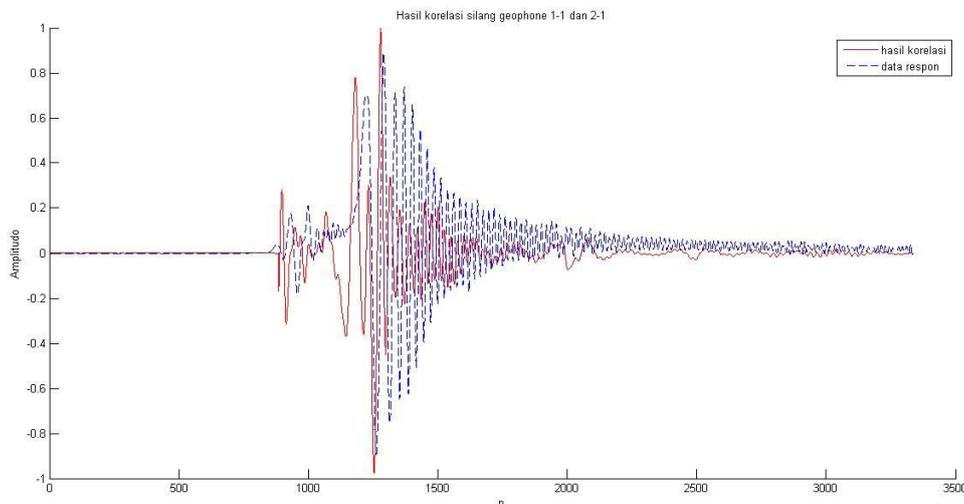
Aplikasi seismik interferometri untuk merubah data *vertical seismic profile* (VSP) menjadi data *crosswell* memanfaatkan fungsi dari korelasi silang. Data *crosswell* sendiri adalah data yang didapatkan dengan menaruh sumber (*shot*) pada salah satu sumur (*well*) dan *receiver* pada sumur lainnya dan data VSP merupakan data yang didapat dengan menaruh sumber pada permukaan dan *receiver* pada sumur. Dengan

menggunakan fungsi korelasi silang pada respon yang diterima oleh *receiver* pada dua buah sumur dengan sumber berada dipermukaan, maka akan didapatkan data respon yang sama dengan respon yang diterima oleh *receiver* di sumur dengan sumber berada pada sumur lainnya. Korelasi silang antara dua respon sinyal dapat menghasilkan respon impuls atau fungsi *green* diantara kedua *receiver* respon tersebut (Campillo dan Paul, 2003).

Sebelumnya telah dipaparkan mengenai proses seismik interferometri dan korelasi silang hingga didapatkan hasil korelasi silang akhir antara *geophone* pada masing – masing set *receiever*. Hasil korelasi ini kemudian dibandingkan dengan respon asli *crosswell* atau respon yang diterima salah satu *receiver* dengan menaruh sumber pada *receiver* lainnya. Berikut adalah contoh pertama perbandingan hasil korelasi silang tersebut.



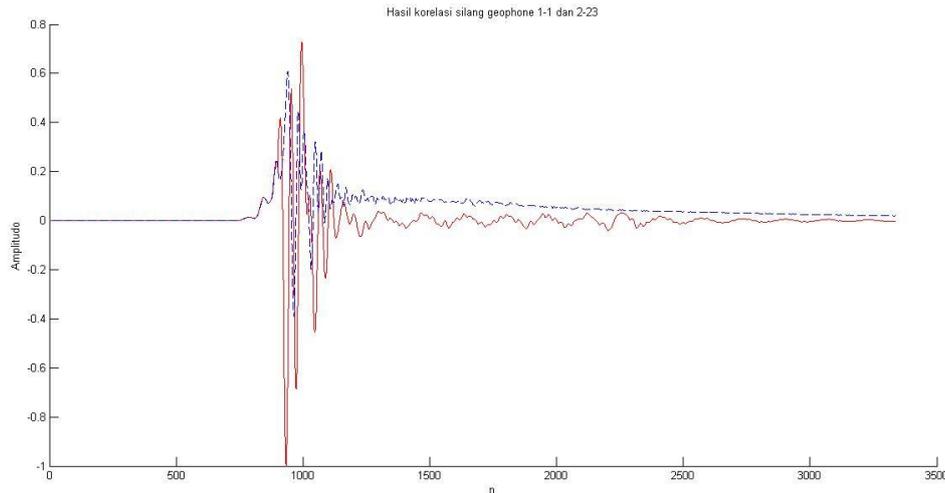
Gambar 7. Contoh hasil korelasi silang (kiri) hasil korelasi silang antara *geophone* 1 pada set *receiver* 1 dan *geophone* 1 pada set *receiver* 2 dan (kanan) hasil korelasi silang antara *geophone* 1 pada set *receiver* 1 dan *geophone* 23 pada set *receiver* 2



Gambar 8. Perbandingan antara hasil korelasi *geophone* 1-1 dan *geophone* 2-1 dengan data respon yang diterima oleh *geophone* 2-1

Gambar 8 memperlihatkan perbandingan bentuk gelombang hasil korelasi silang antara *geophone* 1 pada set *receiver* 1 dan *geophone* 1 pada set *receiver* 2 dengan data respon *shot* yang ditembakkan dari *receiver* 1 dan diterima oleh set *receiver* 2. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa hasil korelasi silang antara *geophone* 1 pada set *receiver* 1 dan *geophone* 1 pada set *receiver* 2 sangat mendekati respon respon *shot* yang ditembakkan dari *receiver* 1 dan diterima oleh set *receiver* 2. Terdapat kemiripan *trace* gelombang antara kedua gambar tersebut. Gelombang datang pertama pada gambar (a) berada di sekitar  $n = 800$  sedangkan pada gambar (b) gelombang datang pertama berada di sekitar  $n = 785$ .

Contoh berikutnya yang akan dibahas adalah perbandingan antara hasil korelasi silang *geophone* 1 pada set *receiver* 1 dan *geophone* 23 pada set *receiver* 2 dengan data respon *shot* yang ditembakkan dari *receiver* 1 dan diterima oleh *geophone* 23 pada set *receiver* 2 yang ditunjukkan oleh gambar berikut :



Gambar 9. Perbandingan antara hasil korelasi *geophone* 1-1 dan *geophone* 2-1 dengan data respon yang diterima oleh *geophone* 2-1

## KESIMPULAN

Data *crosswell* telah berhasil disintesis dari data *vertical seismic profile* (VSP) dengan menerapkan metode seismik interferometri. Data *crosswell* dapat disintesis dengan cara melakukan korelasi silang antar respon pada dua buah sumur dengan masing-masing respon bersumber dari shot di permukaan.

Korelasi silang yang dilakukan antar respon yang diterima oleh *geophone* pada dua buah *well* mampu menghasilkan data *crosswell* yang cukup mendekati data aslinya yaitu data yang diambil dari suatu *receiver* pada salah satu sumur dimana sumbernya ditempatkan pada sumur lainnya. Kemiripan antara data hasil korelasi silang dengan data asli paling mudah dilihat dari gelombang datang pertama dan bentuk gelombangnya. Seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.21 sampai gambar 4.24 gelombang datang pertama antara data respon dan data hasil korelasi berada di kisaran  $n$  yang sama. Pada tugas akhir ini ditampilkan hasil untuk korelasi *geophone* 1 pada set *receiver* 1 dan *geophone* 1 pada set *receiver* 2 serta korelasi *geophone* 1 pada set *receiver* 1 dan *geophone* 23 pada set *receiver* 2. Dari kedua hasil korelasi tersebut setelah dibandingkan didapatkan kesimpulan bahwa terdapat kemiripan diantara hasil dan data asli, sehingga metode ini bisa dimanfaatkan untuk mensintesis data *crosswell* dari data pengukuran lapangan dengan cara yang sederhana. Oleh karena itu dengan metode ini data *crosswell* dapat dihasilkan tanpa harus menggunakan sumber yang diletakkan di dalam sumur.

## REFERENSI

1. Arai, H., & Tokimatsu, K., 2004, *S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum*, Bulletin of the Seismological Society of America, 94(1),
2. Bakulin, A., and R. Calvert, 2006, The virtual source method: Theory and case study: *Geophysics*, 71, no. 4, SI139–SI150.
3. Berryhill, J. R., 1979, Wave-equation datuming: *Geophysics*, 44, 1329–1344.
4. Bolt, B. A., 1982, *Inside the Earth*. Freeman, San Francisco.
5. Campillo, M., & Paul, A., 2003, *Long-range correlations in the diffuse seismic coda*. *Science*, 299 (5606), 547-549.
6. Gadallah, R. M., dan Fisher, R., 2009, *Exploration Geophysics*. Springer. Berlin
7. Kearey, P., Brooks, M., dan Hill, I., 2002, *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
8. Lowrie, W., 2007, *Fundamentals of Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge.
9. Minato, S., Onishi, K., Matsuoka, T., Okajima, Y., Tsuchiyama, J., Nobuoka, D., dan Iwamoto, T., 2007, *Cross-well seismic survey without borehole source*, In 2007 SEG Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists.

10. Nurhandoko, B. E. B., 2000, *Wide-band Fresnel zone wavepath tomography and its application to crosswell and land seismic refraction imaging: Proc. of Intl. Conf. &Exhib.*, AAPG.
11. Nurhandoko, Bagus Endar B., Wely, W., Setiadi, Herlan., dan Riyanto, Erwin., 2015, *Passive Seismic Tomography Appkication for Cave Monitoring in DOZ Underground Mine PT. Freeport Indonesia*, AIP Conference Proceedings, 1656 070003.
12. Poliannikov, O. V., & Malcolm, A., 2011, *Interferometric Microseism Localization for Multistage Fracture Monitoring*, In 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
13. Reynolds, J.M., 1997, *An introduction to Applied and Enviromental Geophysics*. John Wiley and Sons, Chichester.
14. Roberts, J. C., & Asten, M. W., 2004, *Resolving a velocity inversion at the geotechnical scale using the microtremor (passive seismic) survey method*, Exploration geophysics, 35(1), 14-18.
15. Saenger, E. H., et al., 2009, *A passive seismic survey over a gas field: Analysis of low-frequency anomalies*. Geophysics, 74(2), O29-O40. Sheriff, R. E., dan Geldart, L., 1995, *Exploration Seismology*. Cambridge University Press, Cambridge.
16. Schuster, G.T., 2009, *Seismic Interferometry*: Cambride University Press, Cambridge.
17. Wapenaar, K., and J. Fokkema, 2006, Green's function representations for seismic interferometry: Geophysics, 71, No. 4, S133-S146.
18. Wapenaar, K., Draganov, D., Snieder, R., Campman, X., Verdel, A., 2010, *Tutorial on seismic interferometry: Part 1 – Basic principles and application*, Geophysics, Vol. 75, No. 5; A195 - A209.
19. Wapenaar, K., Slob, E., Snieder, R., & Curtis, A., 2010, *Tutorial on seismic interferometry: Part 2— Underlying theory and new advances*, Geophysics, 75(5), 75A211-75A227.