

Application of Double-Difference Method on Microearthquake Data in A Geothermal Area with MATLAB Based Program

Fachriza Fathan¹, Yunus Daud², Surya Aji Pratama³ and Wambra Aswo Nuqramadha³

¹Geothermal Laboratory, Department of Physics, The University of Indonesia

²Master Program in Geothermal Exploration, Graduate Program of Physical Science, The University of Indonesia

³PT NewQuest Geotechnology, Indonesia

fachriza.fathan@gmail.com

Keywords: hypocenter relocation, double-difference method, microearthquake, MATLAB, *Delta-Hypo*

ABSTRACT

Seismicity analysis for the study of tectonic processes, earthquake recurrence, and earthquake interaction requires precise knowledge of earthquake hypocenter locations. The accuracy of absolute hypocenter locations is controlled by several factors, one of which is knowledge of the crustal structure. The effects of errors in structure can be effectively minimized by using double-difference relocation methods. This method works by minimizing residual between observed and calculated differential travel time between two events which assumed had a similar ray path between the source region and a common station. In this research, the author uses synthetic data which varies in velocity model and real data from a certain region near fault structure. These data were processed using *HYPOTH* program that applies Geiger method to obtain initial hypocenter locations, and then relocated using artificial MATLAB based program (*Delta-Hypo*) and *HypoDD* program that applies double-difference method. The synthetic data processing results give epicentral accuracy improvement up to 48% and focal-depth up to 42%, which shows that double-difference method can successfully relocate hypocenters so that parameters with better accuracy are obtained, although there are simplification in velocity model used. The real data processing results show that the hypocenter locations are appropriate with existing geological and fault structure in the field.

PENDAHULUAN

Analisis seismik untuk mempelajari proses tektonik, kejadian gempa dan interaksi gempa membutuhkan pengetahuan yang akurat terhadap lokasi hiposenter gempa. Namun, ketidakpastian selalu muncul dari setiap penentuan lokasi hiposenter tersebut. Ketidakpastian lokasi gempa tersebut memiliki ukuran spasial yang jauh lebih besar dari dimensi sumber gempa itu sendiri, yang kemudian menjadi pembatas untuk mempelajari struktur seismik. Akurasi lokasi hiposenter dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah pemahaman terhadap struktur lapisan. (Pavlis, 1986; Gomberg *et al.*, 1990).

Pengaruh dari kekeliruan terhadap struktur kecepatan lapisan dapat dengan efektif diminimalisasi menggunakan metode lokasi gempa relatif (Frémont dan Malone, 1987). Jika jarak pisah hiposenter antara dua gempa memiliki jarak yang relatif kecil dibandingkan dengan jarak gempa terhadap stasiun dan panjang skala heterogenitas kecepatan, maka kedua gempa tersebut dapat memiliki lintasan gelombang yang sama di sepanjang hampir seluruh lintasan menuju stasiun (Waldhauser dan Ellsworth, 2000). Metode relokasi ini juga dikenal dengan istilah metode *double-difference*; dengan algoritma yang kemudian dibangun oleh Waldhauser dan

Ellsworth (2000). Algoritma tersebut menjadikan metode *double-difference* sebagai metode relokasi yang efisien, cepat dan menghasilkan error yang kecil (Waldhauser, 2001).

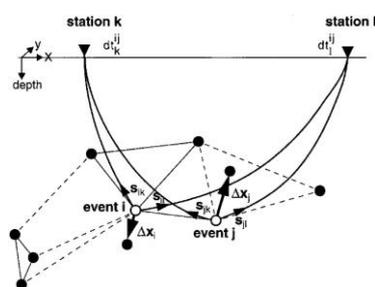
Pada penelitian ini, prinsip kerja metode relokasi gempa *double-difference* dipelajari lebih lanjut untuk kemudian diterapkan pada data sintetik dan riil menggunakan program berbasis MATLAB. Data tersebut juga diolah menggunakan program *HypoDD* (Waldhauser, 2001) yang juga menggunakan metode relokasi gempa *double-difference*, kemudian dilakukan komparasi hasil pengolahan data yang diberikan oleh kedua program.

TINJAUAN PUSTAKA

• Metode Relokasi Hiposenter

Metode penentuan lokasi hiposenter dapat mengalami kekeliruan yang dipengaruhi oleh ketidaksesuaian dari struktur kecepatan lapisan yang digunakan. Pengaruh dari kekeliruan ini dapat dengan efektif diminimalisasi menggunakan metode lokasi gempa relatif (Frémont dan Malone, 1987). Jika jarak pisah hiposenter antara dua gempa memiliki jarak yang relatif kecil dibandingkan dengan jarak gempa terhadap stasiun dan panjang skala heterogenitas kecepatan, maka kedua gempa tersebut dapat memiliki lintasan gelombang yang sama di sepanjang hampir seluruh lintasan menuju stasiun pengukuran.

Pada kasus tersebut, selisih waktu tempuh dari dua gempa yang teramati pada suatu stasiun diperkirakan independen terhadap heterogenitas kecepatan dan kekeliruan dari model kecepatan struktur yang digunakan. Dengan demikian, hal ini dapat menjadi keterangan tambahan yang memberikan informasi spasial antara kedua gempa dengan akurasi tinggi. Ilustrasi metode lokasi gempa relatif ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Ilustrasi metode lokasi gempa relatif (*double-difference*); dua gempa, *i* dan *j*, lokasi awal (lingkaran putih) dan vektor slowness terkait, *s*, terhadap dua stasiun *k* dan *l*. Lintasan rambat gelombang dari sumber ke stasiun ditunjukkan pada gambar. Panah tebal ($\Delta\mathbf{x}$) menunjukkan vektor relokasi dari gempa *i* dan *j* (Waldhauser dan Ellsworth, 2000).

• **Algoritma Metode Double-Difference**

Fungsi *arrival time*, T , untuk sebuah gempa i , menuju sebuah stasiun seismik k , dapat diekspresikan menggunakan teori sinar (*ray theory*) sebagai integral lintasan sepanjang sinar, dengan:

$$T_k^i = \tau^i + \int_l^k u \, ds \quad (1)$$

dimana τ adalah waktu kejadian gempa i , u adalah kelambatan (*slowness*), dan ds adalah elemen panjang lintasan. Akibat hubungan nonlinear antara waktu tempuh dengan lokasi gempa, ekspansi Taylor (Geiger, 1910) umumnya digunakan untuk melinearisasi persamaan (1) sehingga diperoleh:

$$\frac{\partial T_k^i}{\partial m} \Delta m^i = r_k^i \quad (2)$$

dimana $r_k^i = (T_k^{obs} - T_k^{cal})^i$, T_k^{obs} adalah waktu perambatan gelombang yang terukur oleh stasiun pengukuran dan T_k^{cal} adalah waktu gelombang teoretik, sedangkan $\Delta m^i = (\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta \tau^i)$.

Persamaan (2) sesuai untuk digunakan dengan waktu tiba. Namun, metode korelasi silang mengukur selisih waktu tiba antara dua gempa, $(T_k^i - T_k^j)^{obs}$. Konsekuensinya, persamaan (2) tidak dapat langsung digunakan. Fréchet (1985) menyusun sebuah persamaan untuk parameter hiposenter relatif antara dua gempa i dan j dengan mengambil selisih dari persamaan (2) untuk pasangan gempa,

$$\frac{\partial T_k^{ij}}{\partial m} \Delta m^{ij} = dr_k^{ij} \quad (3)$$

dimana $\Delta m^{ij} = (\Delta x^{ij}, \Delta y^{ij}, \Delta z^{ij}, \Delta \tau^{ij})$ adalah perubahan relatif pada parameter hiposenter antara dua gempa, dan turunan parsial dari T terhadap m adalah komponen vektor kelambatan (*slowness vector*) dari gelombang yang menghubungkan sumber dan stasiun yang terukur pada sumber. Perhatikan bahwa pada persamaan (3) yang menjadi sumber sebenarnya adalah *centroid* (titik tengah) antara kedua gempa, dengan mengasumsikan vektor kelambatan antara kedua gempa bernilai konstan. dr_k^{ij} pada persamaan merupakan residu antara selisih waktu tempuh terukur dengan teoretik antara dua gempa, didefinisikan dengan:

$$dr_k^{ij} = (T_k^i - T_k^j)^{obs} - (T_k^i - T_k^j)^{cal} \quad (4)$$

Persamaan ini didefinisikan sebagai *double-difference*. Perhatikan bahwa persamaan (4) dapat menggunakan fase waktu tiba yang terukur (*absolute travel-time differences*) maupun korelasi silang (*relative travel-time differences*).

Asumsi bahwa vektor kelambatan konstan hanya dapat berlaku untuk dua gempa yang memiliki jarak cukup dekat. Persamaan umum yang berlaku untuk dua gempa i dan j diperoleh dengan mengambil selisih antara persamaan (4) dan menggunakan vektor kelambatan yang sesuai, sehingga:

$$\frac{\partial T_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial T_k^j}{\partial m} \Delta m^j = dr_k^{ij}, \quad (5)$$

atau jika ditulis secara lengkap,

$$\frac{\partial T_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial T_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial T_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i - \frac{\partial T_k^j}{\partial x} \Delta x^j - \frac{\partial T_k^j}{\partial y} \Delta y^j - \frac{\partial T_k^j}{\partial z} \Delta z^j - \Delta \tau^j = dr_k^{ij} \quad (6)$$

Turunan parsial dari waktu tempuh, T , untuk gempa i dan j , terhadap lokasi (x, y, z) dan waktu kejadian gempa (τ), dihitung dengan parameter hiposenter dan lokasi stasiun k yang merekam kedua gempa tersebut. Δx , Δy , Δz , dan $\Delta \tau$ adalah perubahan parameter hiposenter yang dibutuhkan untuk membuat model sesuai dengan data.

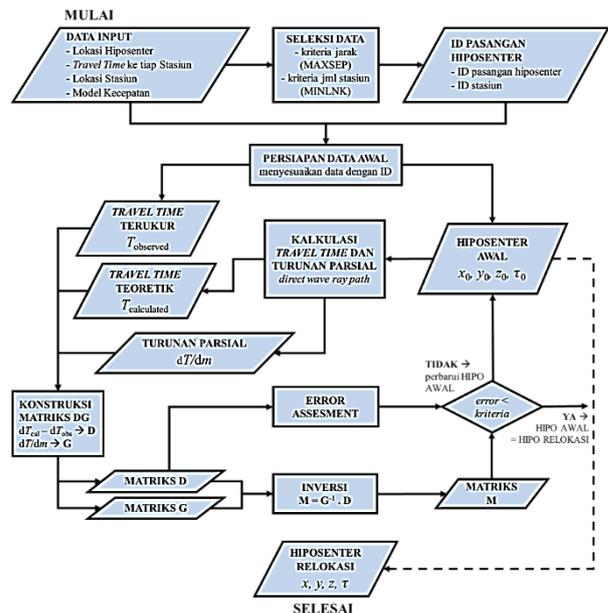
Kombinasi dari persamaan (6) dari semua pasangan hiposenter untuk satu stasiun, dan untuk semua stasiun untuk membentuk sistem persamaan linier memenuhi persamaan matriks:

$$Gm = d \quad (7)$$

dimana G didefinisikan sebagai matriks berukuran $M \times 4N$ (M , jumlah observasi *double-difference*; N , jumlah gempa) yang berisi turunan parsial, d adalah vektor data yang berisi *double-difference* (4) dan m adalah vektor sepanjang $4N$, berisi perubahan parameter hiposenter yang ingin ditentukan.

PEMBUATAN PROGRAM

Metode relokasi hiposenter *double-difference* diaplikasikan menggunakan program yang dibuat dengan basis MATLAB. Program relokasi *double-difference* dibuat menggunakan *script editor*, yang terdiri dari *script* utama dan beberapa *script* yang berisi fungsi eksternal pendukung. Program ini kemudian diberi nama “Delta-Hypo” yang mengandung makna sesuai dengan tujuan program ini, yaitu merelokasi parameter hiposenter untuk mendapatkan lokasi hiposenter yang lebih baik. Alur kerja program lebih rinci ditunjukkan pada **Gambar 2**.



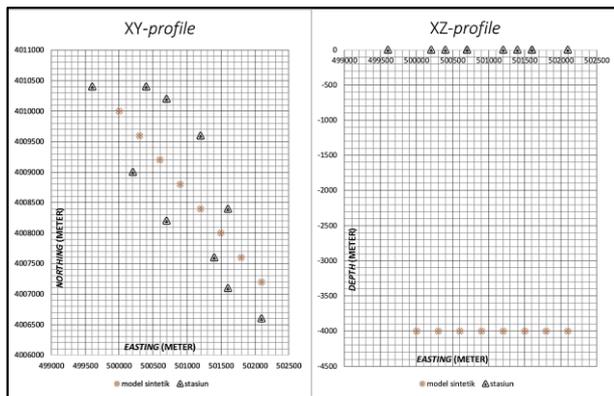
Gambar 2. Bagan alir alur kerja program relokasi gempa Delta-Hypo.

Secara umum, proses relokasi gempa menggunakan metode *double-difference* dilakukan melalui beberapa tahap. Tahap pertama disebut *pre-processing*. Pada tahapan tersebut program melakukan persiapan data input dan menyeleksi data pasangan hiposenter. Tahap berikutnya disebut *processing*. Pada tahap ini program melakukan penghitungan waktu tempuh dan turunan parsial, membangun matriks D dan G , melakukan inversi matriks M , menghitung nilai hiposenter baru, dan melakukan iterasi.

PENGOLAHAN DATA

• **Penentuan Lokasi Hiposenter**

Penelitian ini menggunakan data sintetik dan data riil. Data sintetik yang digunakan mengacu pada model sintetik yang dibuat seperti ditunjukkan pada **Gambar 3** dengan model kecepatan lapisan seperti ditunjukkan pada **Tabel 1**.



Gambar 3. Pola persebaran event dan stasiun model sintetik pada profil lateral (kiri) dan profil kedalaman (kanan).

Tabel 1. Model kecepatan yang digunakan pada data sintetik.

NO. OF LAYER	VELOCITY (m/s)	DEPTH (m)
Layer-1	3770	0
Layer-2	4640	1000
Layer-3	5340	3000
Layer-4	5750	6000
Layer-5	6220	14000
Layer-6	7980	25000

Tabel 2. Variasi model kecepatan yang digunakan pada pengolahan data penentuan lokasi hiposenter awal dari data sintetik.

VAR A	VEL. (m/s)	DEP. (m)	VAR B	VEL. (m/s)	DEP. (m)
Layer-1	3770	0	Layer-1	2960	0
Layer-2	4640	1000	Layer-2	3190	500
Layer-3	5340	3000	Layer-3	4720	1500
Layer-4	5750	6000	Layer-4	4950	3000
Layer-5	6220	14000	Layer-5	5510	6000
Layer-6	7980	25000	Layer-6	5960	12000
-	-	-	Layer-7	7950	25000

Tabel 3. Model kecepatan yang digunakan pada data riil.

NO. OF LAYER	VELOCITY (m/s)	DEPTH (m)
Layer-1	2100	0
Layer-2	3300	2900
Layer-3	3700	3600
Layer-4	4200	4200
Layer-5	4500	4600
Layer-6	6000	5700
Layer-7	7000	16000

Dari model tersebut, waktu tiba gelombang P dan S dihitung secara teoretik menggunakan model kecepatan yang ditunjukkan pada **Tabel 1**. Data hasil penghitungan teoretik waktu tiba tersebut kemudian diolah kembali menggunakan program *HYPOT1* untuk mendapatkan lokasi hiposenter. Penentuan lokasi hiposenter dilakukan dengan menggunakan dua varian model kecepatan yang digunakan, varian A dan B, dengan varian A merupakan lokasi hiposenter yang ditentukan dengan model kecepatan yang sama dengan model kecepatan sebenarnya, sedangkan varian B menggunakan model kecepatan yang berbeda dengan model kecepatan sebenarnya. Model kecepatan pada varian A dan B ditunjukkan oleh **Tabel 2**.

Penelitian ini juga melakukan relokasi hiposenter menggunakan data riil pada lapangan geothermal daerah X. Sistem geothermal di wilayah ini memiliki tipe stratovulkanik andesit dengan luas area prospek sekitar 40 km² dan berada

pada ketinggian 1280 hingga 2341 di atas permukaan laut. Data riil yang digunakan terdiri dari 144 *event* gempa dan diukur oleh 12 stasiun pengukuran. Data tersebut diolah menggunakan program *HYPOT1* untuk mendapatkan lokasi hiposenter awal. Pengolahan data tersebut menggunakan model kecepatan seperti ditunjukkan pada **Tabel 3**.

• **Relokasi Parameter Hiposenter**

Setelah data parameter hiposenter awal didapatkan, tahap pengolahan data untuk relokasi hiposenter dilakukan. Program *Delta-Hypo* digunakan untuk merelokasi parameter hiposenter gempa. Program *Delta-Hypo* dijalankan melalui *script* "DeltaHypo.m". Sebelum program dijalankan, kriteria MAXSEP, MINLNK dan *error criteria* perlu diatur terlebih dahulu. Kriteria MAXSEP berkaitan dengan jarak terjauh yang dapat dimiliki oleh sepasang hiposenter. Kriteria MINLNK berkaitan dengan jumlah stasiun minimum yang mengukur pasangan hiposenter. Sedangkan, *error criteria* berkaitan dengan kriteria henti yang ditetapkan. Nilai *error criteria* dihitung melalui selisih dari residual pada iterasi saat itu dengan residual pada iterasi sebelumnya.

Berikutnya, program *HypoDD* juga digunakan untuk merelokasi parameter hiposenter gempa. Program tersebut dijalankan melalui *terminal* pada sistem operasi Linux. Proses pengolahan data pada *HypoDD* terbagi menjadi dua tahap, yaitu *data pre-processing* (pada program disebut sebagai PH2DT) dan *data processing* (pada program disebut HYPODD). Masing-masing tahap memiliki pengaturan parameter input tersendiri.

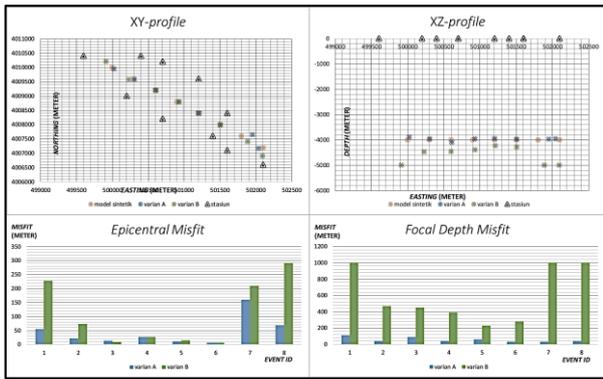
Pada tahap PH2DT, parameter input dapat diatur pada *file* "ph2dt.INP". Parameter input yang diatur antara lain; MINWGHT, MAXDIST, MAXSEP, MAXNGH, MINLNK, MINOBS, dan MAXOBS. Pada tahap HYPODD, parameter input yang dapat diatur pada *file* "hypodd.INP" antara lain; *data type selection* (IDAT-IPHA-DIST), *event clustering* (OBSCC-OBSCT), *solution control* (ISTART-ISOLV-NSET), *data weighting and re-weighting* (NITER-WTCCP-WTCCS-WRCC-WDCC-WTCTP-WTCTS-WRCT-WDCT-DAMP).

HASIL DAN PEMBAHASAN

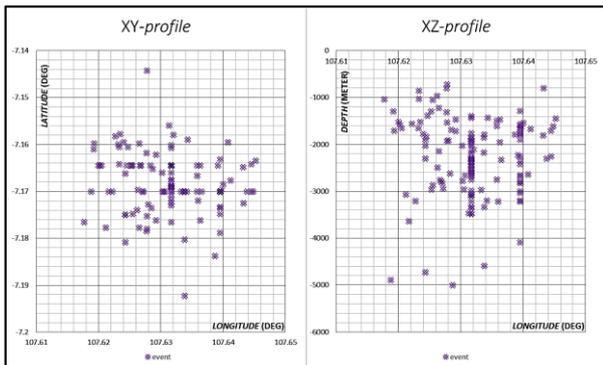
• **Penentuan Lokasi Hiposenter**

Hasil penentuan lokasi hiposenter pada data sintetik beserta nilai ketidaksesuaiannya (*misfit*) untuk kedua varian ditunjukkan pada **Gambar 4**. Penentuan lokasi hiposenter menggunakan program *HYPOT1* memberikan hasil yang berbeda untuk data sintetik kedua varian. Dilihat secara lateral (*xy-profile*), sebaran hiposenter untuk kedua varian memiliki pola yang hampir sama. Namun, perbedaan cukup signifikan terlihat ketika hiposenter dilihat dari penampang melintang (*xz-profile*). Perbedaan lebih jelas terlihat pada *misfit* antara kedua varian, yang menunjukkan bahwa varian B memiliki *misfit* yang lebih besar dibandingkan dengan varian A. Perbedaan *misfit* yang dihasilkan menjadi indikasi bahwa penentuan lokasi hiposenter bergantung pada model kecepatan lapisan yang digunakan.

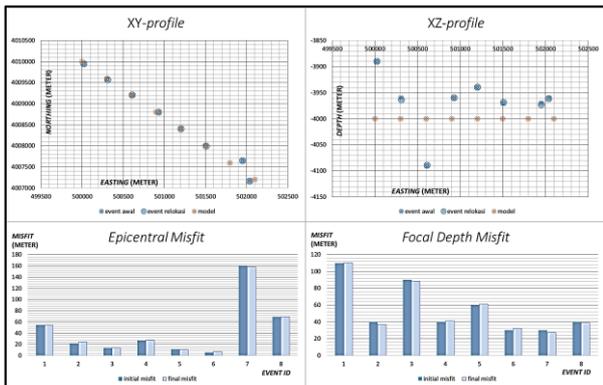
Pengaruh dari model kecepatan lapisan yang digunakan dengan penentuan hiposenter juga ditunjukkan pada komparasi antara *misfit* episentral (*epicentral misfit*) dan *misfit* kedalaman (*focal depth misfit*) varian B. Dari gambar, terlihat bahwa *misfit* episentral memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan *misfit* kedalaman. Hal ini berkaitan dengan karakteristik model pelapisan yang digunakan. Model kecepatan lapisan yang digunakan pada varian B memiliki karakteristik yang sama secara horizontal dengan model awal-



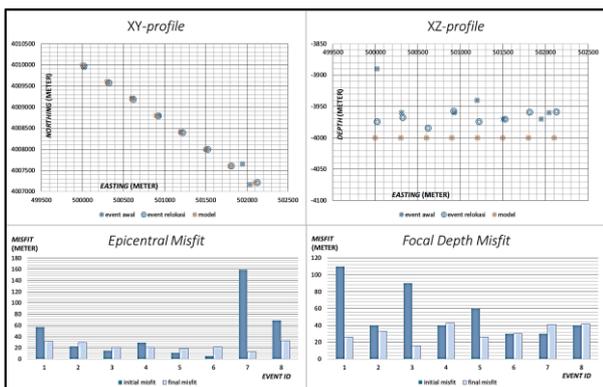
Gambar 4. Pola persebaran event dari model sintetik, varian A, varian B dan stasiun beserta misfit-nya pada profil lateral (kiri) dan kedalaman (kanan).



Gambar 5. Pola persebaran event dari data riil pada profil lateral (kiri) dan profil kedalaman (kanan).



Gambar 6. Pola sebaran event dari sebelum dan setelah relokasi beserta misfit-nya pada varian A dengan Delta-Hypo.



Gambar 7. Pola sebaran event dari sebelum dan setelah relokasi beserta misfit-nya pada varian A dengan HypoDD.

(keduanya menggunakan model pelapisan horizontal). Perbedaan pada varian B dengan model awal berada pada variasi kecepatan secara vertikal. Kesamaan karakteristik secara horizontal inilah yang kemudian menyebabkan *misfit* episentral yang dimiliki varian B lebih kecil dibandingkan dengan *misfit* kedalamannya.

Secara lateral, terdapat pula variasi yang muncul pada hasil penentuan lokasi hiposenter. Varian A dan varian B memiliki perbedaan model kecepatan lapisan yang digunakan. Namun, kedua varian memberikan kesamaan pola pada lokasi episenter yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa kesamaan pola tersebut tidak dipengaruhi oleh perbedaan model kecepatan lapisan yang digunakan.

Pada **Gambar 4**, terlihat pola sebaran stasiun pengukuran yang mengelilingi *cluster* gempa secara relatif acak dan tidak terdistribusi secara merata. Terlihat bahwa daerah di ujung *cluster* memiliki stasiun yang lebih sedikit dengan konfigurasi kurang melingkupi *event* dengan baik dibandingkan dengan daerah di tengah *cluster*. Kesamaan pola pada konfigurasi stasiun dengan akurasi penentuan episenter mengindikasikan bahwa kedua hal ini saling berkaitan. Semakin baik konfigurasi stasiun pengukuran di sekitar *event*, lokasi *event* tersebut dapat ditentukan dengan semakin akurat.

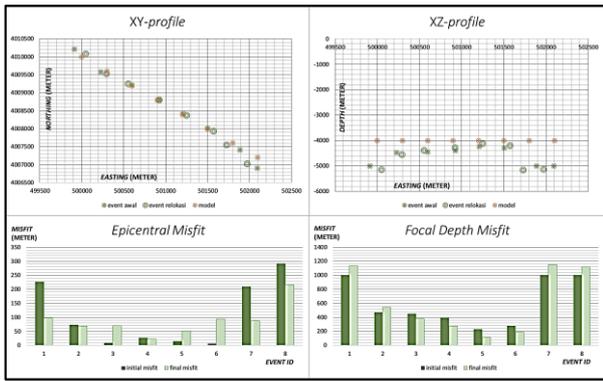
Pada pengolahan data riil, pola sebaran hiposenter ditunjukkan pada **Gambar 5**. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa hiposenter memiliki pola yang acak. Jika hiposenter berasal dari suatu patahan, maka umumnya yang terbentuk adalah pola garis seperti patahan yang menghasilkan hiposenter tersebut. Perlu dilakukan langkah lebih lanjut untuk meningkatkan akurasi penentuan lokasi hiposenter yang ada.

• **Relokasi Parameter Hiposenter Data Sintetik**

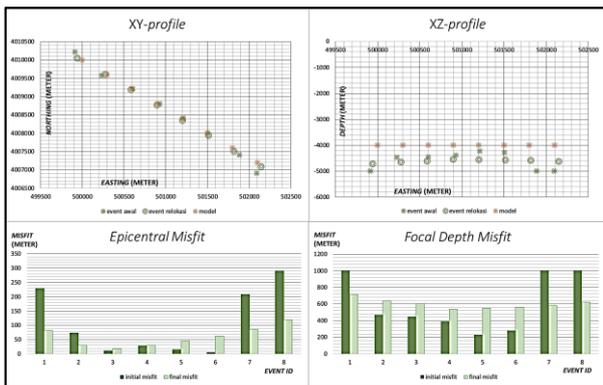
Pengolahan data dilakukan pada data sintetik varian A dan B. Pengolahan dilakukan dengan program *Delta-Hypo* dan *HypoDD*. Hasil relokasi parameter hiposenter varian A beserta *misfit*-nya dengan program *Delta-Hypo* dan *HypoDD* ditunjukkan pada **Gambar 6 – 7**. Hasil relokasi parameter hiposenter varian B beserta *misfit*-nya dengan program *Delta-Hypo* dan *HypoDD* ditunjukkan pada **Gambar 8 – 9**. Hasil pengolahan data tersebut memberikan pola yang bervariasi, seperti ditunjukkan pada beberapa gambar di atas.

Pengolahan data dengan kedua program memberikan hasil yang berbeda. Pada data varian A, program *Delta-Hypo* memberikan perubahan parameter hiposenter yang tidak signifikan. Hal tersebut ditunjukkan pada **Gambar 6**, di mana lokasi episenter sebelum dan sesudah relokasi hampir berimpit. Hal tersebut juga ditunjukkan pada kurva *misfit* yang menunjukkan perubahan dengan nilai yang tidak signifikan. Hal lain ditunjukkan pada pengolahan data varian B menggunakan program *Delta-Hypo*. Pada **Gambar 8** terlihat adanya perubahan yang cukup signifikan dari posisi hiposenter, didukung dengan perubahan signifikan dari *misfit* yang dimiliki.

Perbedaan hasil yang diberikan oleh kedua varian yang digunakan merepresentasikan kemampuan program dalam merelokasi parameter hiposenter untuk masing-masing varian. Varian A memiliki model kecepatan lapisan yang akurat, sesuai dengan model sintetik awal yang dibuat. Lain halnya dengan varian B yang memiliki model kecepatan lapisan yang berbeda dengan model sintetik awal. Setelah dilakukan pengolahan data melalui *HYPOT1* untuk menentukan lokasi hiposenter awal, varian B memiliki *misfit* awal yang lebih besar dibandingkan dengan varian A. *Misfit* tersebut merepresentasikan *error* yang dimiliki oleh masing-masing varian. Hal ini lah yang kemudian memungkinkan perubahan-



Gambar 8. Pola sebaran event dari sebelum dan setelah relokasi beserta misfit-nya pada varian B dengan Delta-Hypo.



Gambar 9. Pola sebaran event dari sebelum dan setelah relokasi beserta misfit-nya pada varian B dengan HypoDD.

Tabel 4. Nilai rata-rata misfit dari kedua program pada kedua varian.

VA-RIAN	AVERAGE MISFIT (m)	EPICENTRAL	FOCAL DEPTH
VAR A	INITIAL	45.97	55.00
	Delta-Hypo	45.48	54.54
	HypoDD	23.78	32.12
VAR B	INITIAL	108.16	602.50
	Delta-Hypo	88.41	611.20
	HypoDD	59.14	602.50

parameter oleh *Delta-Hypo* pada varian B memiliki nilai lebih besar dibandingkan dengan perubahan pada varian A. Semakin besar *misfit* awal yang ada, semakin besar pula perubahan parameter hiposenter yang terjadi untuk mengoreksi *misfit* tersebut, dan sebaliknya.

Pada pengolahan data varian B oleh program *Delta-Hypo*, relokasi yang dilakukan memberikan hasil yang bervariasi. Kurva *misfit* pada **Gambar 8** menunjukkan; pada hiposenter yang berada di ujung *cluster*, terjadi koreksi episenter yang cukup signifikan. Namun yang terjadi pada hiposenter di tengah *cluster* justru sebaliknya. Pola yang sama juga muncul pada relokasi yang dilakukan oleh program *HypoDD* terhadap varian B yang ditunjukkan pada **Gambar 9**. Perbedaan pola pada bagian tengah dan ujung *cluster* dimungkinkan terjadi karena konfigurasi stasiun pengukuran yang berbeda pada bagian tersebut.

Berdasarkan teori, metode *double-difference* merelokasi gempa dengan mengasumsikan bahwa dua gempa akan memiliki lintasan rambat gelombang yang sama terhadap suatu stasiun ketika jarak kedua gempa jauh lebih kecil dibandingkan dengan jaraknya terhadap stasiun dan berada

dalam skala heterogenitas kecepatan. Artinya, jarak stasiun terhadap hiposenter memiliki pengaruh terhadap kemampuan metode *double-difference* dalam merelokasi gempa. Semakin jauh jarak stasiun terhadap pasangan hiposenter, relokasi parameter hiposenter dapat dilakukan dengan lebih baik, dan sebaliknya. Teori tersebut sesuai dengan fenomena yang terjadi pada kurva *misfit* episentral varian B menggunakan kedua program.

Pola yang berbeda muncul pada *misfit* kedalaman menggunakan program *Delta-Hypo*. *Misfit* tersebut memiliki pola yang berbeda dengan pola *misfit* kedalaman yang dimiliki oleh program *HypoDD*. Berdasarkan teori jarak hiposenter terhadap stasiun, semestinya relokasi dapat dilakukan dengan lebih baik pada hiposenter yang memiliki jarak lebih jauh dengan stasiun pengukuran terdekatnya, yaitu pada hiposenter di ujung *cluster*. Ketidaksesuaian perubahan kedalaman pada program *Delta-Hypo* mengindikasikan adanya kekurangan yang dimiliki oleh program ini. Perubahan kedalaman hiposenter pada relokasi berkaitan dengan turunan parsial fungsi waktu terhadap kedalaman. Ada kemungkinan bahwa fenomena tersebut muncul akibat adanya kekeliruan pada komputasi turunan parsial fungsi waktu terhadap kedalaman, sehingga program tersebut perlu untuk dievaluasi.

Nilai rata-rata *misfit* dari kedua program untuk kedua varian disajikan pada **Tabel 4**. Dari nilai tersebut, terlihat bahwa pada kasus ini (khususnya pada varian B) koreksi signifikan terjadi pada koreksi lateral, ditandai dengan nilai *misfit* episentral yang berkurang ketika program merelokasi data, namun tidak demikian pada *misfit* kedalaman. Hal ini tentunya berkaitan dengan kemampuan metode *double-difference* dalam merelokasi hiposenter pada parameter kedalaman. Melihat pola yang dibentuk oleh relokasi program *HypoDD* pada varian B, pola relokasi yang dibentuk menyerupai pola lokasi hiposenter yang memiliki kedalaman yang sama. Meski demikian, kedalaman yang dicapai oleh hasil relokasi tidak sesuai dengan lokasi awal di mana hiposenter berada.

Komparasi kedua program untuk seluruh pengolahan data dapat dilihat pada seluruh gambar hasil pengolahan data. Dari masing-masing program untuk setiap pengolahan data, dihitung nilai *misfit* rerata untuk episentral dan kedalaman. Komparasi nilai tersebut disajikan pada **Tabel 4**. Dari nilai tersebut, terlihat bahwa pada kasus ini (khususnya pada varian B) koreksi signifikan terjadi pada koreksi lateral, ditandai dengan nilai *misfit* episentral yang berkurang ketika program merelokasi data, namun tidak demikian pada *misfit* kedalaman. Hal ini tentunya berkaitan dengan kemampuan metode *double-difference* dalam merelokasi hiposenter pada parameter kedalaman. Melihat pola yang dibentuk oleh relokasi program *HypoDD* pada varian B, pola relokasi yang dibentuk menyerupai pola lokasi hiposenter yang memiliki kedalaman yang sama. Meski demikian, kedalaman yang dicapai oleh hasil relokasi tidak sesuai dengan lokasi awal di mana hiposenter berada.

Seperti yang telah dibahas sebelumnya, koreksi parameter kedalaman dari hiposenter berkaitan dengan turunan parsial fungsi waktu terhadap kedalaman. Bentuk turunan terhadap parameter tertentu berbanding terbalik dengan nilai perubahan parameter tersebut (misal; $\partial T / \partial x \sim 1 / \Delta x$). Pada model sintetik yang dibuat, seluruh hiposenter berada pada kedalaman yang sama, atau dalam hal ini selisih kedalaman antara suatu stasiun dengan semua hiposenter akan memiliki nilai yang sama. Hal tersebut akan membuat nilai turunan fungsi waktu terhadap kedalaman dari masing-masing hiposenter bernilai relatif sama; sehingga ketika metode *double-difference* bekerja, selisih nilai yang kemudian menjadi perubahan parameter-

kedalaman hiposenter, pada kasus ini akan menghasilkan selisih total bernilai nol. Secara fisis, nilai tersebut akan merelokasi hiposenter pada kedalaman tertentu sehingga seluruh hiposenter tersebut memiliki selisih kedalaman bernilai nol (dengan kata lain, memiliki kedalaman yang sama).

Kekeliruan yang muncul pada koreksi kedalaman hiposenter pada kasus ini bukan disebabkan oleh metode *double-difference*. Dikatakan demikian karena metode tersebut akan merelokasi hiposenter relatif terhadap hiposenter yang lain. Pada kasus ini, hiposenter direlokasi sehingga memiliki kedalaman yang sama dengan kedalaman hiposenter lainnya. Kontribusi terbesar pada kasus ini disebabkan oleh kesalahan awal pada saat menentukan lokasi hiposenter. Pada gambar terlihat bahwa lokasi hiposenter awal memiliki kedalaman yang berbeda dengan kedalaman asal, dan sebagian besar hiposenter berada pada kedalaman tersebut. Metode *double-difference* akan merelokasi hiposenter yang lain sehingga memiliki kedalaman yang sama dengan hiposenter tersebut.

Tabel 4 juga merepresentasikan kemampuan program dalam merelokasi kasus yang ada. Kemampuan program untuk meningkatkan akurasi hiposenter dapat dinyatakan dengan AI (*accuracy improvement*) yang merupakan perbandingan antara perubahan misfit setelah direlokasi dengan misfit awal, atau:

$$AI = \frac{\text{initial misfit} - \text{final misfit}}{\text{initial misfit}}$$

Dengan data misfit pada **Tabel 4**, program *Delta-Hypo* mampu merelokasi hiposenter dengan peningkatan akurasi episentral hingga 18% dan kedalaman hingga 1%. Sedangkan, program *HypoDD* mampu merelokasi hiposenter dengan peningkatan akurasi episentral hingga 48% dan kedalaman hingga 41%. Nilai AI tersebut menunjukkan bahwa, pada kasus ini, dapat disimpulkan bahwa program *HypoDD* dapat merelokasi hiposenter gempa dengan lebih baik. Nilai *misfit* akhir yang lebih kecil dibandingkan *misfit* awal membuktikan bahwa metode *double-difference* mampu untuk merelokasi parameter hiposenter gempa, sekalipun parameter hiposenter awal ditentukan dengan model kecepatan lapisan yang berbeda.

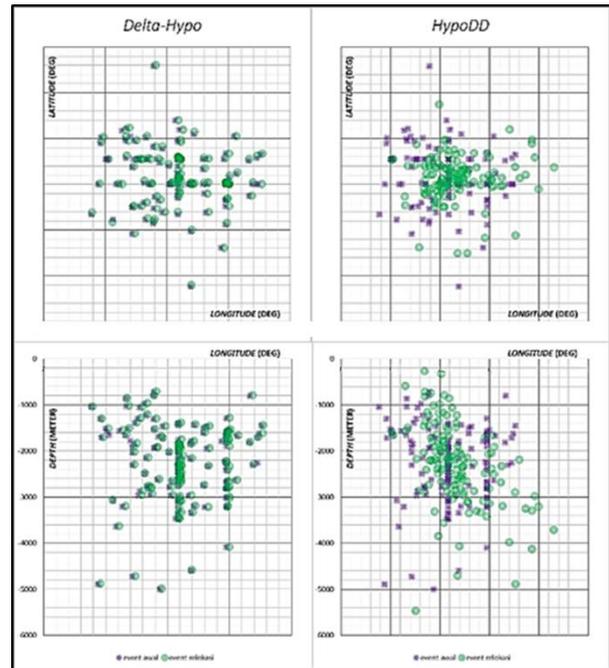
• **Relokasi Parameter Hiposenter Data Riil**

Hasil relokasi parameter hiposenter data riil dengan program *Delta-Hypo* dan *HypoDD* ditunjukkan pada **Gambar 10**. Program *HypoDD* terlihat mampu merelokasi hiposenter lebih efektif, dilihat dari pergeseran lokasi yang terjadi setelah hiposenter direlokasi.

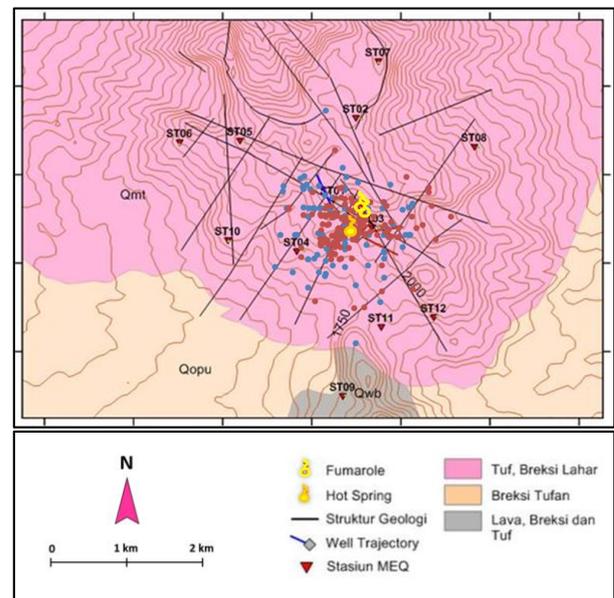
Penelitian ini juga melakukan pengujian terhadap hasil relokasi hiposenter dan kesesuaiannya terhadap data sekunder. Data sekunder yang digunakan pada penelitian ini adalah informasi geologi struktur yang diperoleh dari peta geologi patahan dan juga manifestasi permukaan. Dalam hal ini, dilakukan pengamatan terhadap korelasi hasil relokasi hiposenter yang diolah menggunakan program *HypoDD* dengan data sekunder yang tersedia. Korelasi lokasi hiposenter dengan data sekunder ditunjukkan pada **Gambar 11**.

Dari peta geologi dan struktur patahan yang tersedia pada **Gambar 11**, terlihat bahwa sebelum direlokasi, hiposenter memiliki distribusi lokasi yang lebih renggang (ditunjukkan oleh titik biru). Setelah direlokasi, hiposenter memiliki distribusi lokasi yang lebih rapat. Hiposenter terdistribusi dengan kecenderungan fokus lokasi yang berkaitan dengan pola struktur geologi permukaan. Hasil relokasi hiposenter juga memiliki distribusi di daerah *fumarole* dan *hot spring*. Keberadaan *fumarole* dan *hot spring* mengindikasikan zona permeabel di bawah permukaan. Dengan demikian, dapat

dinilai bahwa hasil relokasi hiposenter yang diperoleh memiliki kesesuaian dengan struktur geologi dan manifestasi permukaan yang ada.



Gambar 10. Pola sebaran event dari sebelum (silang ungu) dan setelah relokasi (lingkaran hijau) pada data riil dengan *Delta-Hypo* (kiri) dan *HypoDD* (kanan).



Gambar 11. Pola sebaran event sebelum (titik berwarna biru) dan setelah (titik berwarna merah) dilakukan relokasi pada peta geologi dan struktur patahan (Heditama, 2014).

KESIMPULAN

Pada penentuan lokasi hiposenter menggunakan metode Geiger (dengan program *HYPOT1*); akurasi penentuan lokasi hiposenter bergantung pada kesesuaian model kecepatan lapisan yang digunakan. Semakin mirip model kecepatan lapisan yang digunakan dengan model kecepatan sebenarnya, lokasi hiposenter dapat ditentukan dengan semakin akurat. Akurasi penentuan lokasi hiposenter juga dipengaruhi oleh konfigurasi stasiun yang digunakan. Konfigurasi stasiun yang

melingkupi hiposenter dengan baik dapat menentukan lokasi hiposenter dengan lebih akurat, dan sebaliknya.

Pada relokasi hiposenter menggunakan metode *double-difference* (dengan program *Delta-Hypo* dan *HYPODD*); koreksi parameter hiposenter yang dilakukan bergantung pada kesesuaian lokasi hiposenter yang tersedia dengan lokasi sebenarnya. Semakin jauh lokasi hiposenter yang tersedia dengan lokasi sebenarnya, semakin besar koreksi parameter hiposenter yang dilakukan, dan sebaliknya. Relokasi parameter pasangan hiposenter bergantung pada jaraknya terhadap stasiun pengukuran. Semakin jauh jarak stasiun terhadap pasangan hiposenter, relokasi parameter pasangan hiposenter dapat dilakukan dengan lebih baik, dan sebaliknya. Relokasi hiposenter dilakukan relatif terhadap hiposenter lain yang memenuhi kriteria. Relokasi hiposenter mampu meminimasi *error* dari model kecepatan yang digunakan. Hal ini dibuktikan oleh keberhasilan relokasi hiposenter hingga memiliki parameter dengan akurasi yang lebih baik, sekalipun dilakukan penyederhanaan pada model kecepatan yang digunakan

Komparasi program *Delta-Hypo* dengan *HypoDD*; secara umum, kedua program telah mampu mengaplikasikan metode *double-difference* untuk merelokasi hiposenter. Program *Delta-Hypo* belum dapat merelokasi parameter hiposenter dengan optimal (terutama pada parameter kedalaman), sehingga program tersebut masih perlu untuk dievaluasi. Pada pengolahan data sintetik, program *Delta-Hypo* mampu mencapai peningkatan akurasi episentral hingga 18%, sedangkan program *HypoDD* mampu mencapai peningkatan akurasi episentral hingga 48%. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa program *HypoDD* dapat merelokasi parameter hiposenter dengan lebih baik.

Relokasi hiposenter pada data riil; metode *double-difference* berhasil merelokasi hiposenter hingga memiliki distribusi yang lebih rapat dengan fokus lokasi yang berkaitan dengan struktur geologi dan manifestasi permukaan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa hasil relokasi hiposenter yang diperoleh memiliki kesesuaian dengan struktur geologi dan manifestasi permukaan yang ada.

DAFTAR ACUAN

- Fréchet, J. **1985**. *Sismogenèse et doublets sismiques*. Thèse d'Etat, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 206 pp.
- Frémont, M.J., dan Malone, S.D. **1987**. *High Precision Relative Locations of Earthquakes at Mount St. Helens, Washington*. Journal of Geophysical Research.
- Geiger, L. **1912**. *Probability Method for the Determination of Earthquake Epicenters from the Arrival Time Only*. Bull. St. Louis Univ., 8, 60-71.
- Gomberg, J.S., Shedlock, K.M., dan Roecker, S.W. **1990**. *The Effect of S-wave Arrival Time Accuracy of Hypocenter Estimation*. Bulletin of the Seismological Society of America.
- Heditama, D.M. **2014**. *Pengembangan Software Analisis Spektrogram dan Studi Tomografi Data MEQ untuk Delineasi Zona Rekahhan di Daerah Geothermal*. Tesis, Universitas Indonesia, Jakarta.
- Jennings, C.W. dan Bryant, W.A. **2010**. *California Geological Survey 150th Anniversary: Fault Activity Map of California*. California Geological Survey.
- Jennings, C.W. **2010**. *California Geological Survey 150th Anniversary: Geologic Map of California*. California Geological Survey.
- Miyazaki, Shinichi. **2007**. *Micro-Earthquake Data Processing and Analysis System (MEPAS)*. Japan Metals and Chemicals Co., Ltd (JMC). Japan.
- Pavlis, G.L. **1986**. *Appraising Earthquake Hypocenter Location Errors: A Complete, Practical Approach for Single-Event Locations*. Bulletin of the Seismological Society of America.
- Waldhauser, F. dan Ellsworth, W.L., **2000**. *A Double-Difference Earthquake Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California*. Bulletin of the Seismological Society of America.
- Waldhauser, F. **2001**. *HypoDD - A Program to Compute Double-Difference Hypocenter Locations*. US Geological Survey Open File Report