

## KORELASI SINYAL GELOMBANG P DALAM PENENTUAN “KELUARGA” GEMPA BUMI

I PUTU DEDY PRATAMA<sup>1\*</sup>, AGUS MARSONO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Stasiun Geofisika Denpasar – BMKG  
Jl. Pulau Tarakan No.1, Dauh Puri Klod, Kec. Denpasar Bar., Kota Denpasar, Bali 80113*

<sup>2</sup> *Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika  
Jalan Perhubungan I No.5 Pondok Betung, Bintaro, Kec. Pd. Aren, Kota Tangerang Selatan,  
Banten 15221*

\*email : [checkmate\\_mail@yahoo.co.id](mailto:checkmate_mail@yahoo.co.id)

**Abstrak.** Pengelompokan gempa bumi didasarkan pada hubungan antargempa bumi yang satu dengan gempa bumi yang lain yang dinyatakan sebagai bentuk “keluarga” gempa bumi. Hubungan tersebut dapat dinyatakan dalam korelasi sinyal gempa bumi. Penelitian ini bertujuan untuk mengelompokkan kejadian gempa bumi menggunakan metode kemiripan sinyal dengan korelasi silang. Berdasarkan kejadian gempa bumi outer rise Sumatera dalam rentang waktu 2011-2013 diperoleh data 69 gempa bumi dari Global CMT. Penulis menggunakan data sinyal format full SEED dari webdc BMKG. Terdapat dua gempa bumi yang tidak memiliki rekaman sinyal dan tiga sinyal gempa bumi yang tidak memiliki rekaman gelombang P pada repository gempa bumi BMKG. Penentuan batasan gempa bumi dependent didasarkan pada hasil normalisasi korelasi silang antargempa bumi. Penentuan “keluarga” dibuat menggunakan dendrogram yang dihitung dengan metrik Chebysev. Semakin tinggi korelasi berarti semakin dekat hubungan “keluarga” atau dalam dendrogram dinyatakan dalam kedekatan dengan titik pertemuan antar cabang. Pembagian temporal untuk korelasi sinyal wilayah outer rise Sumatera menunjukkan hasil yang acak untuk setiap cluster, sedangkan pembagian spasial menunjukkan hasil yang cenderung menunjukkan pengelompokan gempa bumi. Pembagian sinyal secara mekanisme fokus menunjukkan hasil yang baik dimana mampu mengelompokkan sinyal berdasarkan mekanisme fokusnya. Secara keseluruhan identifikasi kemiripan sinyal dengan korelasi silang dapat digunakan dalam menentukan gempa bumi dependent.

**Kata kunci:** normalisasi korelasi silang, outer rise, dendrogram, “keluarga”

**Abstract.** Grouping of earthquakes based on the relationship between an earthquake with another earthquake is expressed as a form of earthquake “families”. The relationship can be expressed in correlation of earthquake signals. This study aims to classify the occurrence of earthquakes using the similarity signal by cross-correlation method. Based on the occurrence of earthquakes in the outer rise Sumatra from 2011-2013, we obtained 69 earthquakes data from Global CMT. We used the signal data in full SEED format from webdc BMKG. There are two earthquakes having no signal records and three signals having no P-wave records from BMKG earthquake repository data. The determination of limit of dependent earthquakes are based on the normalized cross-correlation from each pair of earthquakes. Determination of “family” is made using a dendrogram which is calculated using the Chebysev metric. The higher correlation means the closer “family” relationship or in the dendrogram expressed in proximity to the meeting point between the branches. Temporal distribution of signal correlations for the outer rise region of Sumatra show random results for each cluster, while the spatial distribution of the results indicated the tendency in clustering of the earthquakes. Grouping signals using focal mechanisms show good results, which can be used to classify signals based on the focal

mechanisms. Overall signal similarity identification using the cross-correlation signal can be used to determine that the earthquakes are dependent.

**Keywords:** normalized cross-correlation, outer rise, dendrogram, "family"

## 1. Pendahuluan

Pengelompokan (*clustering*) gempabumi berdasarkan keterkaitan antargempabumi dibedakan menjadi dua bagian: (1) gempabumi *independent* yaitu gempabumi yang tidak bergantung pada gempabumi lain dan (2) gempabumi *dependent* yaitu gempabumi yang bergantung pada gempabumi lain seperti gempabumi pendahuluan, susulan, maupun multiplet. Gempabumi pendahuluan menyatakan *cluster* gempabumi yang terjadi sebelum gempabumi yang lebih besar (gempabumi utama) dan *cluster* gempabumi dengan magnitudo yang hampir sama dinyatakan sebagai gempabumi multiplet (untuk kasus berpasangan dinyatakan sebagai gempabumi doublet), sedangkan gempabumi susulan menyatakan *cluster* gempabumi yang terjadi setelah gempabumi utama [1]. Tsujiura [2] memperkenalkan istilah "keluarga" untuk gempabumi yang menunjukkan rangkaian gempabumi pendahuluan, utama, dan susulan. Kegunaan metode *cluster* antara lain untuk menghitung probabilitas kejadian gempabumi susulan [3] dan analisis pola seismik [4], [5].

Beberapa metode diterapkan dalam menentukan *cluster* kejadian gempabumi dari data seismisitas seperti pembagian spasial-temporal [6], interaksi zona model [7], dan analisis multifraktal [8]. Gardner dan Knopoff [6] membuat teknik mengelompokkan kejadian gempabumi *dependent* dengan spesifikasi secara spasial dan temporal dari gempabumi susulan sebagai fungsi dari magnitudo gempabumi utama.

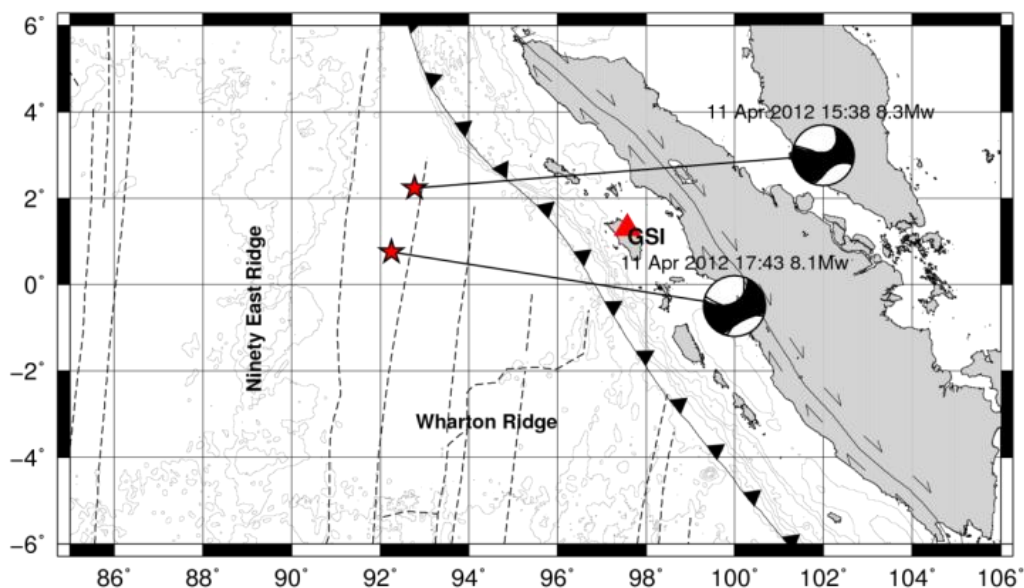
Barani, dkk. [9] menyatakan bahwa analisis kemiripan sinyal dapat digunakan dalam prosedur *cluster* dalam mengidentifikasi gempabumi *dependent*. Metode analisis korelasi silang sinyal dapat digunakan untuk menentukan kelompok gempabumi *dependent* yang dinyatakan dengan kedekatan lokasi, mekanisme patahan, dan pola penjalaran yang digunakan untuk mengidentifikasi rangkaian kejadian gempabumi dan menghilangkan kejadian gempabumi *dependent*.

Penulisan ini memfokuskan kejadian gempabumi 11 April 2012 yang tergolong gempabumi doublet. Gempabumi pertama terjadi pukul 15:38 WIB yang terletak pada lempeng Indo-Australia dengan episenter  $2.4^{\circ}$  LU –  $92.9^{\circ}$  BT dengan magnitudo 8.3 Mw dan kedalaman 10 km, sedangkan gempabumi kedua terjadi pukul 17:43 WIB yang terletak pada episenter  $0.8^{\circ}$  LU –  $92.3^{\circ}$  BT dengan magnitudo 8.1 Mw dan kedalaman 24 km.

Pemilihan gempabumi pada daerah ini didasarkan pada pola kejadiannya yang cukup unik dan tidak diduga oleh para peneliti dengan magnitudonya yang cukup besar. Berdasarkan data sinyal yang bisa diunduh, penulis memilih kejadian gempabumi besar di Indonesia untuk kejadian tahun 2011 ke atas. Pemilihan gempabumi besar ( $M_w > 7$ ) bertujuan agar data sinyal untuk gempabumi susulannya banyak tercatat pada stasiun yang sama. Selain itu, gempabumi besar cenderung memiliki data katalog mekanisme fokus yang baik karena getarannya tercatat pada banyak stasiun.

Kedua gempabumi ini (Gambar 1) memiliki mekanisme fokus yang mirip yaitu sesar geser (strike slip fault). Adapun gempabumi pada 11 Januari 2012 dengan

kemiripan mekanisme fokus dan pada lokasi yang berdekatan diduga merupakan satu “keluarga” dengan gempabumi 11 April 2012.



Gambar 1. Lokasi gempa bumi doublet 11 April 2012

Berdasarkan katalog data mekanisme fokus dari Global CMT, gempabumi Simeulue (Gambar 1) yang terjadi pada 11 April 2012 merupakan kejadian gempabumi dengan mekanisme fokus strike slip terbesar yang tercatat oleh rekaman seismogram. Sejak tahun 2010 daerah tersebut mengalami peningkatan aktifitas seismik hingga puncaknya pada 11 April 2012 terjadi gempabumi doublet [10]. Aktifitas seismik pada daerah tersebut masih berlangsung hingga sekarang.

## 2. Metode Penelitian

Sinyal seismogram dipilih berdasarkan kejadian gempabumi sekitar *outer rise* Sumatera dengan wilayah episenter berada pada batasan koordinat  $85^{\circ}$  BT- $94^{\circ}$  BT dan  $4^{\circ}$  LS-  $6^{\circ}$  LU. Data parameter gempabumi dan mekanisme fokus diunduh dari Global CMT (<http://www.globalcmt.org>) [11], [12] berupa 69 data parameter dan mekanisme fokus gempabumi dari tahun 2011-2013. Mekanisme gempabumi di wilayah ini didominasi oleh mekanisme patahan strike slip.

Penelitian ini menggunakan data rekaman sinyal dari sensor broadband Streckeisen STS-2/N yang berlokasi Gunung Sitoli-Nias (GSI) dengan koordinat sensor  $1.3039^{\circ}$  LU dan  $97.5755^{\circ}$  BT. Pemilihan data dari stasiun GSI karena data GSI mencatat sinyal terbanyak untuk gempabumi wilayah *outer rise* Sumatera periode tahun 2011-2013. Stasiun yang terdekat terhadap gempabumi wilayah tersebut meliputi stasiun BSI, LHMI, PBSI, SISI, dan GSI. Namun, stasiun yang datanya tercatat dengan baik dan dapat diunduh di webdc BMKG adalah data stasiun GSI.

Data sinyal diunduh dari webdc BMKG berupa format full SEED. Untuk dapat diolah dengan Matlab perlu dilakukan konversi sinyal full SEED ke ASCII. Data onset gelombang P diperoleh dari data repository gempabumi BMKG. Sinyal

gempabumi gempabumi doublet 11 April 2012 yang tercatat di sensor Streckeisen STS-2/N stasiun GSI.

Berdasarkan data parameter gempabumi dan mekanisme fokus yang diunduh dari Global CMT dengan parameter dan mekanisme fokus gempabumi dari tahun 2011-2013, penulis membuat plot peta mekanisme fokus gempabumi. Data tersebut juga digunakan acuan untuk mengunduh data sinyal gempabumi dari stasiun GSI dari webdc BMKG yang berupa data dengan format fullSEED.

Data sinyal format fullSEED dikonversi menjadi format ASCII dengan perangkat lunak SeisGram2K untuk dilakukan pencuplikan sinyal 6 detik setelah onset gelombang P yang telah difilter dengan bandpass filter 1 sampai 10 Hz. Data sinyal yang telah dilakukan pencuplikan sinyal 6 detik kemudian dilakukan proses korelasi silang terhadap sinyal yang lain. Perhitungan normalisasi korelasi silang menggunakan Matlab 7.11.

Dalam penentuan kemiripan sinyal digunakan fungsi normalisasi korelasi silang seperti Pers. 1 [13]:

$$\rho(l) = \frac{r_{xy}(l)}{\sqrt{r_{xx}(0)r_{yy}(0)}} \quad (1)$$

Dimana  $\rho(l)$  merupakan nilai normalisasi korelasi silang dengan rentang 0 sampai 1,  $r_{xy}(l)$  korelasi silang antara dua sinyal dalam fungsi x dan y,  $r_{xx}(0)$  dan  $r_{yy}(0)$  adalah korelasi diri pada  $l = 0$  yang memiliki nilai sama dengan akumulasi kuadrat sinyal.

Penentuan batasan gempabumi *dependent* didasarkan pada hasil normalisasi korelasi silang antargempabumi. Nilai normalisasi korelasi digunakan untuk mengetahui nilai kemiripan antara dua sinyal. Penentuan “keluarga” dibuat menggunakan dendrogram yang dihitung dengan metrik Chebysev. Metrik Chebysev memasang sinyal korelasi tertinggi. Semakin tinggi korelasi berarti semakin dekat hubungan “keluarga” atau dalam dendrogram dinyatakan dalam kedekatan sinyal dengan titik pertemuan antarcabang dendrogram.

Hasil dari pengelompokan gempabumi menggunakan dendrogram kemudian diplot secara spasial dalam bentuk peta. Perbedaan *cluster* menggunakan warna yang disesuaikan dengan warna pada dendrogram. Untuk penentuan secara temporal gempabumi disimbolkan dengan nomor berdasarkan urutan kejadian gempabumi dimana nomor satu adalah gempabumi yang pertama dan nomor terakhir menyatakan gempabumi terakhir dalam data katalog yang digunakan

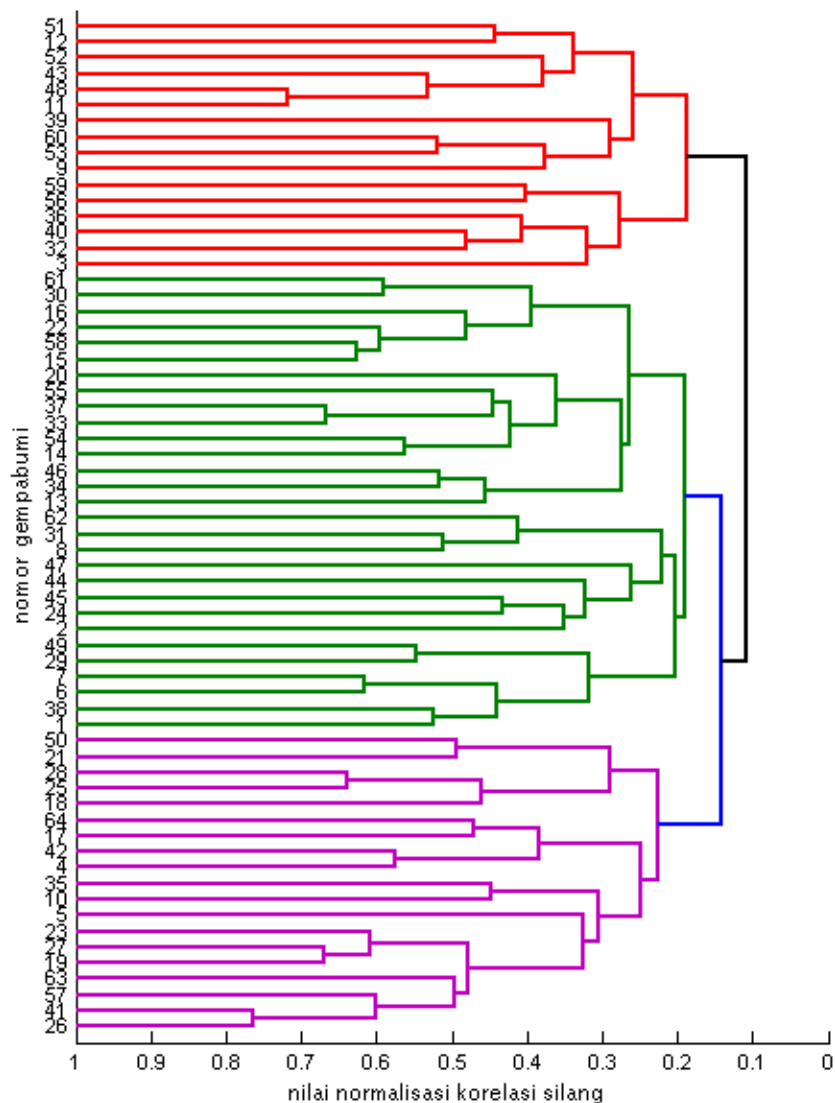
### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Dendrogram Normalisasi Korelasi Silang

Data yang diperoleh dari Global CMT untuk wilayah *outer rise* Sumatera dari 7 Januari 2011 sampai dengan 22 November 2013 sejumlah 69 data mekanisme fokus gempabumi. Dari data tersebut kemudian dicari sinyal gempabumi yang tercatat pada sensor GSI. Terdapat dua gempabumi yang sinyalnya tidak memiliki terekam pada sensor GSI dan tiga sinyal gempabumi tidak memiliki catatan rekaman gelombang P pada repository gempabumi BMKG. Oleh karena itu, jumlah sinyal gempabumi yang dibuat korelasi sinyal sebanyak 64 gempabumi. Data sinyal 64

gempabumi kemudian dipotong untuk mendapatkan data sinyal 6 detik setelah onset gelombang P kemudian dilakukan bandpass filter. Nilai korelasi sinyal ini digunakan sebagai acuan untuk pembuatan dendrogram (Gambar 2). Data sinyal 6 detik yang telah difilter kemudian dilakukan normalisasi korelasi silang antarsinyal, sehingga terdapat 2016 korelasi.

Nilai korelasi hasil kombinasi 2 dari 64 sinyal tersebut digunakan sebagai data input (masukan) dalam pembuatan dendrogram. Dendrogram yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan metrik Chebysev yang memasangkan sinyal dengan nilai korelasi tertinggi. Nilai korelasi yang tinggi menunjukkan dua sinyal tersebut memiliki hubungan "keluarga" yang dekat. Dendrogram menghubungkan pasangan dengan nilai korelasi tertinggi. Cabang terpendek menunjukkan hubungan korelasi tertinggi demikian sebaliknya. Semakin jauh percabangan berarti nilai korelasi antarsinyal tersebut semakin rendah.



**Gambar 2.** Clustering gempabumi menggunakan dendrogram berdasarkan nilai normalisasi korelasi silang antarsinyal (sumbu horizontal) dari data 64 gempabumi wilayah outer rise Sumatera

Apabila pasangan-pasangan dengan korelasi tertinggi telah dipasangkan, maka dibuat lagi percabangan dengan sinyal yang belum memiliki pasangan. Sinyal yang belum berpasangan kemudian dipasangkan dengan pasangan sinyal yang berkorelasi tertinggi terhadap sinyal yang belum berpasangan tersebut, sehingga semua sinyal memiliki hubungan percabangan. Cara pemasangan ini dilakukan kembali dengan memasang setiap percabangan sinyal berdasarkan nilai korelasinya. Semakin jauh jarak percabangannya maka nilai korelasinya semakin rendah. Dendrogram akan memasang setiap sinyal terhadap sinyal yang lain dan berlanjut hingga seluruh sinyal memiliki percabangan yang berkumpul pada satu percabangan.

Pembagian dendrogram menunjukkan hubungan cluster seluruh kejadian gempa bumi dari hasil normalisasi korelasi silang sinyal 6 detik setelah onset pertama gelombang P. Untuk memudahkan pembacaan setiap kejadian gempa bumi disimbolkan dengan nomor sesuai dengan urutan kejadian gempa bumi berdasarkan deret waktu yang ditampilkan dalam sumbu vertikal. Pada sumbu horizontal menyatakan nilai normalisasi korelasi silang antarsinyal gempa bumi.

Dalam dendrogram pada Gambar 2 korelasi tertinggi ada pada pasangan sinyal nomor 26 dan 41 yaitu 0,7634. Pertemuan antara sinyal 26 dan 41 kemudian dihubungkan dengan sinyal lain yang memiliki korelasi tinggi dengan sinyal nomor 26 dan 41 yaitu sinyal nomor 57 yang memiliki korelasi 0,6858 dengan sinyal nomor 26 dan memiliki korelasi 0,6019. Dendrogram menghubungkan percabangan sinyal nomor 26 dan 41 dengan sinyal nomor 57 pada korelasi terendah yaitu 0,6019. Selanjutnya dicari sinyal yang memiliki korelasi tinggi dengan ketiganya (sinyal nomor 26, 41, dan 57) yaitu sinyal nomor 63 dengan nilai korelasi dengan sinyal nomor 26 sebesar 0,5029, dengan sinyal nomor 41 sebesar 0,5475, dan dengan sinyal nomor 57 sebesar 0,4996. Dendrogram menghubungkan percabangan sinyal nomor 26, 41, dan 57 dengan sinyal nomor 63 pada korelasi terendah yaitu 0,4996. Proses yang sama juga berlaku untuk sinyal-sinyal yang lain hingga dendrogram membuat percabangan dengan seluruh sinyal yang digunakan.

Berdasarkan uji korelasi yang dilakukan oleh Slinkard, dkk. (2013) *clustering* suatu gempa bumi yang menunjukkan kemiripan sangat bergantung pada: (1) bentuk patahan dan (2) jarak stasiun terhadap hiposenter disesuaikan agar sinyal 6 detik tidak termasuk gelombang S. Untuk wilayah *outer rise* Sumatera sebagian besar gempa bumi memiliki mekanisme fokus strike slip. Stasiun terdekat terhadap gempa bumi wilayah tersebut adalah BSI, LHMI, PBSI, SISI, dan GSI. Namun, stasiun yang data sinyalnya tercatat dengan baik dan dapat diunduh di webdc adalah data stasiun GSI.

Korelasi antar-keluarga dengan korelasi tertinggi antara dua gempa bumi. Untuk mencari kedekatan setiap pasangan sinyal dilakukan dengan menelusuri pertemuan percabangan antarsinyal. Untuk korelasi tertinggi terdapat pada gempa bumi nomor 26 dan nomor 41. Secara temporal gempa bumi ini memiliki rentang perbedaan waktu 23 hari, sedangkan secara spasial berjarak 873 km. Hal ini menunjukkan korelasi tidak berhubungan dengan variasi secara spasial.

Secara garis besar pembagian dendrogram pada korelasi sinyal gempa bumi wilayah *outer rise* Sumatera memiliki perbandingan 1:3 untuk *cluster* merah dan biru.

Pembagian tersebut didasarkan pada dendrogram yang bercabang dua. Kemudian setiap cabang juga akan mempunyai cabang lain yang berjumlah dua demikian seterusnya. Pembagian dendrogram juga didasarkan pada warna dimana cabang yang memiliki warna yang sama menunjukkan bahwa korelasinya tinggi.

Untuk gempabumi doublet (nomor 5 pada *cluster* ungu dan nomor 6 pada *cluster* hijau) berada pada jarak yang cukup jauh. Jika dihubungkan dengan dendrogram, gempabumi nomor 5 dan 6 berada pada cabang kedua (*cluster* warna biru). Nilai korelasi sinyal kedua gempabumi ini bernilai 0,2409. Nilai tersebut masih dibawah rata-rata dimana secara keseluruhan rata-rata korelasi silang bernilai 0,3321.

Gempabumi doublet pertama (nomor 5) memiliki kedekatan “keluarga” dengan gempabumi nomor 4 yaitu satu *cluster* warna ungu, sedangkan gempabumi doublet kedua (nomor 6) memiliki kedekatan dengan gempabumi setelahnya yaitu gempabumi nomor 7 (*cluster* hijau). Untuk kejadian gempabumi sebelum gempabumi utama (nomor 1, 2, dan 3) menunjukkan kedekatan yang rendah terhadap gempabumi utama nomor 5. Namun, gempabumi nomor 2 dan 3 berada satu *cluster* dengan gempabumi utama nomor 6.

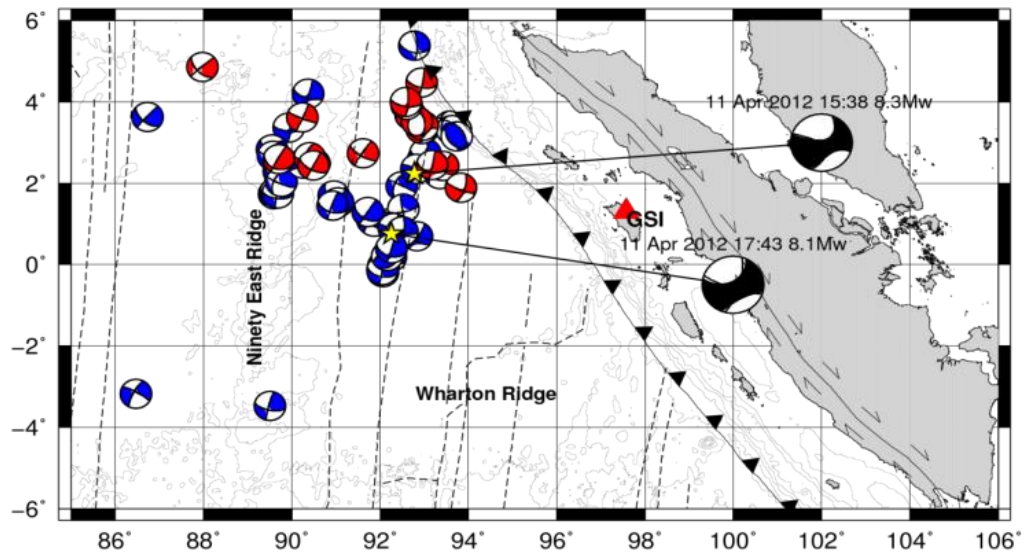
Secara spasial pembagian dendrogram menunjukkan hasil yang baik pada sebagian besar *cluster*. Namun, terdapat beberapa data yang cukup menyimpang secara spasial maupun temporal. Hal ini disebabkan oleh kualitas data yang kurang baik (data hilang, gelombang P tidak tercatat, dan kesalahan picking), perbedaan magnitudo yang cukup signifikan, dan azimuth dan jarak gempabumi terhadap stasiun yang bervariasi [14].

Berdasarkan data mekanisme fokus gempabumi dari Global CMT terdapat 52 pola sesar geser, 7 pola sesar naik, dan 5 pola sesar turun. Pola sesar geser tersebar pada seluruh *cluster*, pola sesar naik tersebar pada *cluster* bawah (satu *cluster* dengan gempabumi nomor 5 yaitu pada *cluster* ungu), sedangkan pola sesar turun tersebar pada *cluster* merah dan hijau. Hal ini menunjukkan *cluster* gempabumi dengan kemiripan sinyal memberikan hasil yang cukup baik dalam pemisahan mekanisme fokus. Hal ini berbeda dengan penelitian Bardainne, dkk. [15] yang memperoleh hasil yang tidak konsisten dalam pengelompokan berdasarkan mekanisme fokus.

### 3.2 Sebaran Cluster Gempabumi

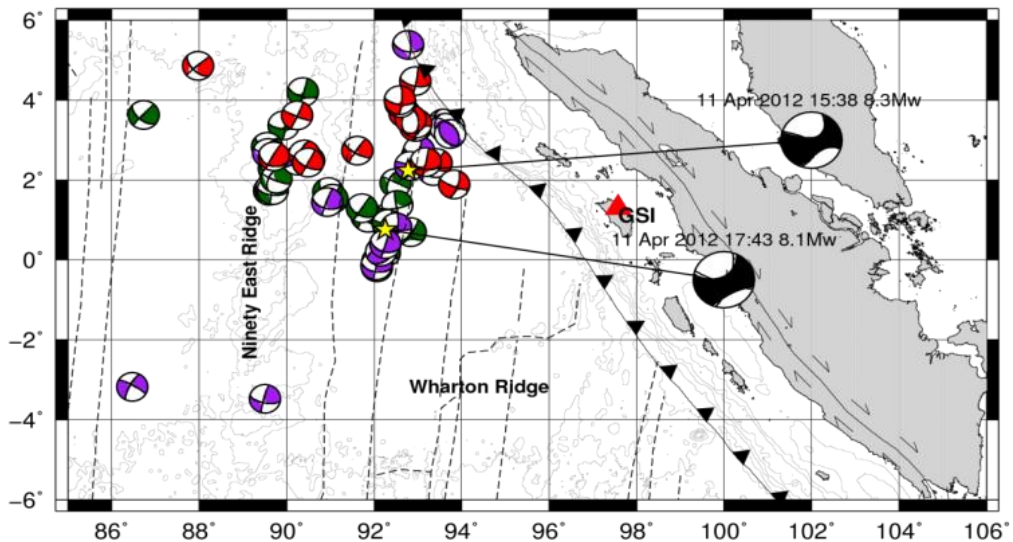
Data *cluster* sinyal dari dendrogram ditampilkan secara spasial dalam bentuk peta bola fokus dengan warna sesuai dengan warna *cluster* pada dendrogram. Pada percabangan pertama dendrogram, *cluster* merah (Gambar 3) cenderung tersebar mengelompok di utara episenter gempabumi doublet 11 April 2012. Mekanisme fokus merah menunjukkan gempabumi dengan korelasi sinyal yang rendah terhadap gempabumi 8.3 Mw dan 8.1 Mw.

Pada umumnya sebaran gempabumi berada pada garis Wharton Ridge dan Ninety East Ridge (NER) terutama pada *cluster* biru, sedangkan untuk *cluster* merah cenderung lebih menyebar terhadap Wharton Ridge. Gempabumi susulan dari gempabumi doublet cenderung menyebar ke arah barat dan utara yang mengikuti alur Wharton Ridge. NER merupakan salah satu fitur vulkanik linear terpanjang di Bumi, membentang sekitar 5600 km ke arah utara-selatan dari 340 LS hingga 170 LU [16].



**Gambar 3.** Sebaran cluster gempa bumi wilayah outer rise Sumatera 2011-2013

Hasil *cluster* gempa bumi doublet pada dendrogram menunjukkan bahwa “keluarga” gempa bumi pertama (nomor 5) yang disimbolkan dengan warna hijau memiliki jumlah yang lebih banyak dibandingkan gempa bumi kedua (nomor 6) yang disimbolkan dengan warna ungu (Gambar 4). Dalam hal ini magnitudo yang lebih besar cenderung memiliki jumlah “keluarga” yang lebih banyak.



**Gambar 4.** Sebaran gempa bumi wilayah outer rise Sumatera tahun 2011-2013 untuk pembagian tiga cluster sesuai dengan warna dendrogram pada Gambar 2

Adapun gempa bumi pada 11 Januari 2012 (nomor 2) dengan kemiripan mekanisme fokus dan pada lokasi yang berdekatan merupakan satu “keluarga” dengan gempa bumi 11 April 2012 (nomor 5 dan 6) yaitu dalam *cluster* biru. Gempa bumi



nomor 2 pada dendrogram berada pada *cluster* hijau yang cenderung memiliki kedekatan dengan gempabumi doublet kedua yaitu gempabumi nomor 6.

Gempabumi pada “keluarga” biru dibagi menjadi dua *cluster* yang dibedakan dengan warna ungu dan hijau. Sebaran gempabumi pada *cluster* ungu sebagian besar tersebar pada garis Wharton Ridge, sedangkan gempabumi pada *cluster* hijau tersebar pada Wharton Ridge dan Ninety East Ridge (NER) dengan posisi lebih mengumpul dibandingkan dengan *cluster* ungu. Kedua gempabumi utama berada pada zona Wharton Ridge tetapi gempabumi susulannya mencapai zona Ninety East Ridge (NER). Hal ini menunjukkan bahwa gempabumi dengan magnitudo yang cukup besar (8,3 Mw dan 8,1 Mw) dapat mempengaruhi sistem patahan didekatnya [17], [1].

Slinkhard, dkk. [18] menyatakan bahwa sebagian gempabumi susulan seharusnya memiliki kemiripan mekanisme sumber karena diproduksi oleh perubahan stress yang sama secara keseluruhan. Karakteristik dari gempabumi susulan, batasan geografis, dan kesamaan mekanisme sumber meningkatkan nilai perhitungan normalisasi korelasi silang antarsinyal karena pada dasarnya semua itu didasarkan pada kesamaan lokasi sumber dengan sumber fisik yang sama, terekam pada alat yang sama, dan memiliki kemiripan sinyal yang tinggi.

#### 4. Kesimpulan

Dari hasil dendrogram, penulis membagi 64 gempabumi dalam tiga “keluarga” yang dinyatakan dengan simbol warna merah, hijau, dan ungu. Pembagian ini didasarkan pada jumlah gempabumi dan tingkat korelasi masing-masing *cluster*. Berdasarkan data mekanisme fokus 64 gempabumi tersebut terdapat 52 pola sesar geser, 7 pola sesar naik, dan 5 pola sesar turun. Pengelompokan korelasi sinyal gempabumi berdasarkan mekanisme fokus menunjukkan bahwa pola sesar geser tersebar pada seluruh *cluster*, pola sesar naik tersebar pada *cluster* ungu, sedangkan pola sesar turun tersebar pada *cluster* merah dan hijau. Pembagian korelasi sinyal gempabumi secara mekanisme fokus menunjukkan hasil yang baik dimana mampu mengelompokkan sinyal berdasarkan mekanisme fokusnya. Pengelompokan hasil normalisasi korelasi silang sinyal seismogram menggunakan dendrogram memudahkan penulis dalam pembuatan *cluster* gempabumi. Pembagian temporal untuk korelasi sinyal wilayah *outer rise* Sumatera menunjukkan hasil yang acak untuk setiap *cluster*, sedangkan pembagian spasial menunjukkan hasil yang cenderung menunjukkan pengelompokan gempabumi. Secara keseluruhan identifikasi kemiripan sinyal dengan korelasi silang dapat digunakan dalam menentukan gempabumi *dependent*.

#### Daftar Pustaka

1. K. R. Felzer, R. E. Abercrombie, dan G. Ekstrom, *A Common Origin for Aftershocks, Foreshocks, and Multiplets*. Bull. Seism. Soc. Am., 94 (2004), hal. 88–98.
2. M. Tsujiura, *Characteristic Frequencies for Earthquake Families and Their Tectonic Implications: Evidence from Earthquake Swarms in the Kanto District, Japan*. Pure Appl. Geophys. 121 (1983), hal.574-600.

3. M. K. Savage dan D. M. Depolo, *Foreshock Probabilities in the Western Great-Basin Eastern Sierra Nevada*. Bull. Seism. Soc. Am., 83 (1993), hal. 1910–1938.
4. P. Reasenberg, *Second-order Moment of Central California seismicity, 1969–1982*. J. geophys. Res., 90 (1985), hal.5478–5495.
5. R. Console, A. M. Lombardi, dan M. Murru, *Bath's law and Self Similarity of Earthquakes*. J. Geophys. Res., 108(B2) (2003), hal .2128.
6. J. K. Gardner dan L. Knopoff, *Is the sequence of Earthquakes in Southern California, with Aftershocks Removed, Poissonian?* Bull. Seism. Soc. Am., 64(1974), hal. 1363–1367.
7. P. A. Reasenberg dan L. M. Jones, *Earthquake Hazard after a Main Shock in California*. Science, 243 (1989), hal.1173–1176.
8. C. Godano, P. Tosi, V. Derubeis, dan P. Augliera, *Scaling Properties of the Spatio-temporal Distribution of Earthquakes: a Multifractal Approach Applied to a Californian Catalogue*. Geophys. J. Int., 136(1999), hal. 99–108.
9. S. Barani, dkk., *The Waveform Similarity Approach to Identify Dependent Events in Instrumental Seismic Catalogues*. Geophys. J. Int. (2007) 168, hal. 100–108.
10. Shrivastava, Mahesh N. dan C. D. Reddy, *The Mw 8.6 Indian Ocean Earthquake on 11 April 2012: Coseismic Displacement, Coulomb Stress Change and Aftershocks Pattern*. Journal Geological Society of India Vol.81 (2013), hal. 813-820.
11. A. M. Dziewonski, T. A. Chou, dan J. H. Woodhouse, *Determination of Earthquake Source Parameters from Waveform Data for Studies of Global and Regional Seismicity*. J. Geophys. Res., 86 (1981), hal. 2825-2852. doi:10.1029/JB086iB04p02825
12. G. Ekström, M. Nettles, and A. M. Dziewonski, *The Global CMT Project 2004-2010: Centroid-moment Tensors for 13,017 Earthquakes*, Phys. Earth Planet. Inter., 200-201(2012), hal.1-9. doi:10.1016/j.pepi.2012.04.002
13. J. G. Proakis dan D. G. Manolakis, *Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, and Application*, Third Edition. Prentice-hall International, INC, New Jersey (1996).
14. D. P. Schaff dan F. Waldhauser, *Waveform Cross-Correlation-Based Differential Travel-Time Measurements at the Northern California Seismic Network*. Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 95, No. 6 (2005), hal. 2446–2461, doi: 10.1785/0120040221
15. Bardainne, dkk., *Characterization of seismic waveforms and classification of seismic events using chirplet atomic decomposition. Example from the Lacqgas field (Western Pyrenees, France)*. Geophys. J. Int. 166 (2006), hal. 699–718
16. K. S. Krishna, *Tectonics of the Ninetyeast Ridge Derived from Spreading records in Adjacent Oceanic Basins and Age Constraints of the Ridge*. J. Geophys. Res. (B: Solid Earth), vol.117; 2012; B04101 (2012), hal. 19.
17. J. Dieterich, *A Constitutive Law for Rate of Earthquake Production and Its Application to Earthquake Clustering*. J. Geophys. Res., 99 (1994), hal.2601-2618.
18. M. Slinkard, D. Carr, dan C. Young, *Applying Waveform Correlation to Three Aftershock Sequences*. Bull. Seismol. Soc. Am., vol. 103 (2013), hal. 675–693, doi: 10.1785/0120120058.