

MODEL PRAKIRAAN KEJADIAN GEMPABUMI DI DAERAH BENGKULU

EARTHQUAKE PREDICTION MODEL IN THE BENGKULU AREA

Sabar Ardiansyah^{1,2}

¹Stasiun Geofisika Kepahiang-Bengkulu, ¹Jl. Pembangunan No. 156 Pasar Ujung Kepahiang-Bengkulu

²Akademi Meteorologi dan Geofisika, ²Jl. Perhubungan 1 No.5 Pondok Betung, Bintaro-Tangerang

E-mail : sabar.ardiansyah@bmk.go.id

Naskah masuk: 03 April 2014; Naskah diperbaiki: 26 Juli 2014; Naskah diterima: 20 Nopember 2014

ABSTRAK

Sebelum terjadi gempabumi utama, biasanya akan didahului oleh suatu pola atau siklus kegempaan. Siklus ini meliputi periode normal, periode anomali yang ditandai dengan peningkatan aktivitas, periode precursory gap yang ditandai dengan penurunan aktivitas seismik, dan periode terjadinya gempabumi utama. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat siklus kegempaan serta membuat model (persamaan) perkiraan terjadinya gempabumi di wilayah Bengkulu untuk kegunaan mengestimasi besarnya magnitudo gempabumi yang akan terjadi berdasarkan model yang dibuat. Data yang digunakan adalah katalog data kegempaan $M \geq 4,5$ di daerah Bengkulu pada rentang tahun 1971-2013 yang diambil melalui website USGS. Metode yang digunakan untuk perhitungan model perkiraan magnitudo gempabumi menggunakan metode predictive regressions dengan perhitungan regresi linier berbobot. Berdasarkan hasil analisis model yang sudah dibuat menunjukkan bahwa siklus kegempaan daerah Bengkulu memasuki periode precursory gap yang ditandai dengan penurunan aktivitas kegempaan dan diperkirakan saat ini daerah Bengkulu memiliki potensi gempabumi dengan kekuatan $M > 7,5$.

Kata kunci : Siklus gempabumi, prekursor, model prakiraan kejadian gempabumi.

ABSTRACT

Before a major earthquake occurs, it will usually be preceded by a pattern or cycle of seismicity. This cycle includes a period of normal, anomalous period marked by increased activity, precursory gap period is characterized by a decrease in seismic activity, and the period of occurrence of major earthquakes. The purpose of this study is to look at seismic cycle and the model (equation) estimates the occurrence of earthquakes in the region for the purposes of estimating the Bengkulu earthquake magnitude that will occur based on the model created. The data used is a catalog of seismic data for $M \geq 4.5$ in the Bengkulu areas in the range of 1971 to 2013 were taken through the USGS catalog. The method used to estimate the magnitude of earthquake model calculations using the predictive regressions with weighted linear regression calculation. Based on the analysis, a model that has been made indicates that the current estimated Bengkulu area have the potential earthquake with the strength of $M > 7.5$ seismicity cycle Bengkulu area entered a period of precursory gap is characterized by a decrease in seismic activity.

Keywords : Earthquake cycle, precursors, earthquake forecast models.

1. Pendahuluan

Beberapa *prekursor* gempabumi seperti deformasi kerak bumi, perubahan level muka air laut, regangan, tegangan kerak bumi, gempabumi pendahuluan, gempabumi *swarm*, *b value*, perubahan kecepatan gelombang seismik, perubahan air tanah, dan gas radon merupakan fenomena yang terjadi sebagai pendahuluan sebelum terjadinya gempabumi [1,2]. Fenomena *prekursor* gempabumi bisa berbeda antara satu daerah dengan daerah lain [3], hal ini terjadi karena adanya perbedaan struktur geologi tiap

daerah. Beberapa penelitian menunjukkan, fluktuasi perubahan aktivitas seismisitas berhubungan erat sebagai indikator prekursor gempabumi. Anomali seismisitas merupakan prekursor yang berhubungan dengan akumulasi stress atau akumulasi energi yang dapat digunakan sebagai mitigasi bencana [4]. Beberapa penelitian yang berhubungan dengan anomali seismisitas antara lain dilakukan oleh Ishida dan Kanamori [5] yang meneliti gempabumi San Fernando tahun 1971, serta penelitian yang dilakukan oleh Marza [6] yang meneliti gempabumi tahun 1977 di Vrancea, Romania.

Prekursor kesenyapan seismisitas (*seismic quiescence*), menggambarkan penurunan aktivitas seismisitas, fenomena ini banyak dikaji oleh para ahli untuk memprediksi gempabumi [7,8]. Mogi [9] melihat pola *seismic quiescence* sebagai aktivitas seismik yang mendahului terjadinya gempabumi besar. Berdasarkan observasi Mogi, sebelum terjadi gempabumi besar telah terjadi aktivitas seismisitas di sekitar episenter gempabumi besar tersebut. Setelah terjadi *seismic quiescence*, biasanya akan diikuti dengan peningkatan gempabumi sebagai gempabumi pendahuluan (*foreshock*). Aktivitas *foreshock* merepresentasikan pergerakan mikro lempeng bumi (*micro-cracking*) sebelum terjadi *rupture*.

Mignan dan Giovambattista [10] pernah melakukan penelitian hubungan antara percepatan seismisitas dan penurunan seismisitas sebelum terjadi gempabumi utama berkekuatan $M = 6,0$ di daerah Umbria-Marche, Italia. Dari hasil penelitian mereka menyimpulkan bahwa sebelum terjadi gempabumi utama akan didahului aktivitas kenaikan dan penurunan seismisitas yang bisa dijadikan sebagai prekursor gempabumi. Paudyal [11] juga melakukan penelitian siklus dan anomali seismisitas gempabumi daerah Nepal, India. Dengan menggunakan data katalog tahun 1980 hingga 2000, kemudian dilihat pola kegempaan sebelum terjadi gempabumi utama tanggal 28 Maret 1999 dengan kekuatan $M = 6,6$. Hasilnya menunjukkan terdapat siklus kegempaan yang teratur yaitu dimulai dari siklus normal (N), *swarm* (A), *precursory gap* (G), dan gempabumi utama (M).

Peningkatan aktivitas seismisitas sebagai gempabumi pendahuluan merupakan bagian dari siklus gempabumi. Aktivitas ini disebut sebagai anomali seismisitas atau *swarm*. Aktivitas *swarm* biasanya berasosiasi dengan aktivitas vulkanik, namun bisa juga berasosiasi dengan aktivitas non-vulkanik [12]. Periode gempabumi *swarm* biasanya terjadi beberapa waktu di sekitar wilayah episenter gempabumi besar sebelum terjadi gempabumi besar tersebut [13].

Evison pernah mengusulkan hipotesis tentang gempabumi *swarm* sebagai prekursor gempabumi berdasarkan hasil penelitiannya di daerah Jepang. Evison juga mengusulkan formula hubungan antara gempabumi *swarm* dan gempabumi utama berdasarkan empat gempabumi signifikan di daerah California dan sembilan gempabumi signifikan di daerah New Zealand yang dia teliti [14]. Formula dari Evison ini kemudian banyak dipakai oleh beberapa peneliti untuk meneliti gempabumi di daerah lain. Para peneliti menganalisis apakah ada pola kegempaan yang teratur sebelum terjadi gempabumi

utama. Misalnya yang dilakukan oleh peneliti untuk gempabumi daerah Burma Azechman, gempabumi Pamir, gempabumi daerah timur laut India [15].

Evison membuat siklus seismik menjadi empat tahapan. Tahap pertama adalah aktivitas normal (*background*), tahap kedua adalah anomali seismisitas yang ditandai peningkatan aktivitas seismik (*swarm*), tahap ketiga adalah *seismic quiescence* (*precursory gap*) yaitu tahap penurunan aktivitas seismisitas, dan tahap keempat terjadinya gempabumi utama (*main shock*).

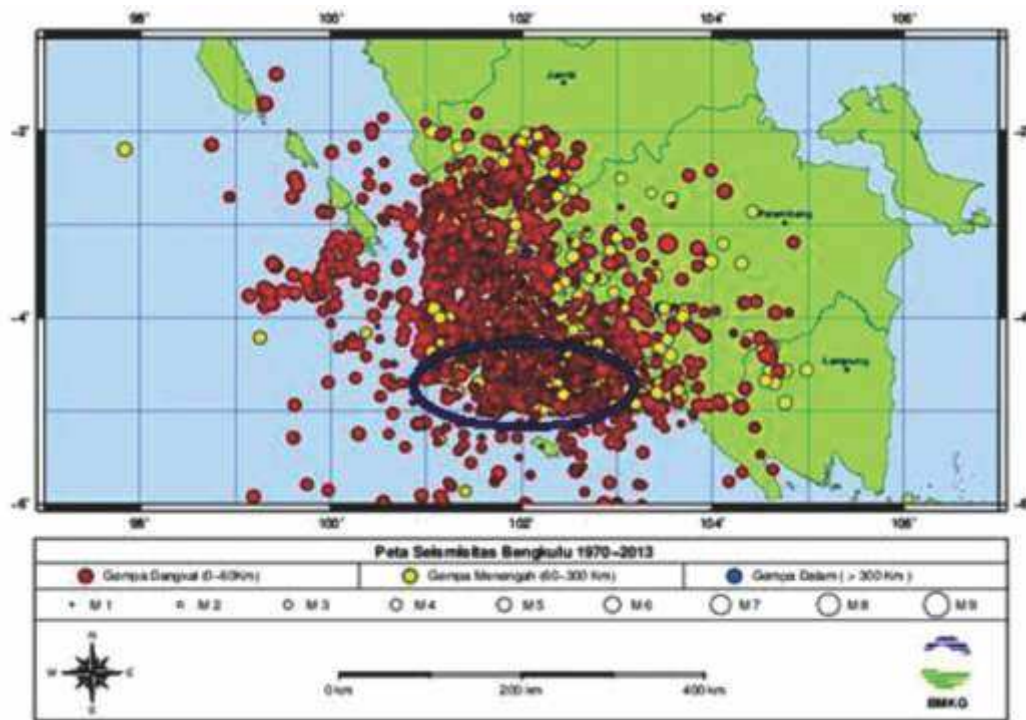
Pada suatu kajian di daerah tertentu periode normal (N), periode Anomali (A), periode *precursory gap* (G), dan periode *main-shock* (M) berturut-turut ditandai dengan periode aktivitas seismik yang rendah, tinggi, rendah, dan tinggi (termasuk aktivitas gempabumi susulan).

Di Indonesia kajian tentang siklus kegempaan serta model perkiraan kejadian gempabumi masih jarang dikaji baik skala regional maupun skala lokal. Sehingga kajian ini menarik untuk dilakukan di kawasan-kawasan seismik aktif seperti pantai barat Sumatera pada umumnya dan wilayah Bengkulu Khususnya. Melalui tulisan ini, penulis akan menganalisis pola aktivitas kegempaan di wilayah Bengkulu sebelum terjadi gempabumi signifikan ($M > 7,0$) untuk periode tahun 1971 hingga 2013.

2. Metode Penelitian

Data yang dipakai untuk analisis dalam tulisan ini menggunakan data katalog gempabumi daerah Bengkulu dan sekitarnya periode tahun 1971 hingga tahun 2013 yang diambil dari katalog USGS. Daerah kajian merupakan daerah Bengkulu yang meliputi koordinat 2,0 LS 6,0 LS dan 98 BT 104 BT. Peta daerah penelitian ditunjukkan pada Gambar 1, sedangkan fokus pemodelan perkiraan gempabumi adalah zona *rupture* gempabumi tanggal 4 Juni 2000 dan 12 September 2007 pada area 3,0 LS 6,0 LS dan 100 BT 104 BT yang ditandai dengan lingkaran biru pada Gambar 1 [16].

Siklus gempabumi signifikan daerah Bengkulu yang akan dianalisis pola kegempaan dan anomali seismisitasnya adalah gempabumi pada tanggal 1 Oktober 1975 ($M = 7,0$), gempabumi tanggal 15 Februari 1994 ($M = 7,0$), gempabumi 4 Juni 2000 ($M = 7,9$), dan Gempabumi tanggal 12 September 2007 ($M = 8,5$).



Gambar 1. Peta daerah studi (Bengkulu) serta seismisitasnya periode tahun 1971-2013. Lingkaran biru pada gambar merupakan fokus wilayah penelitian yang akan dibuatkan model perkiraan kejadian gempabumi.

Teori Tentang Regresi Model Perkiraan Magnitudo Gempabumi. Evison [17] mengusulkan formula pemodelan perkiraan magnitudo gempabumi berdasarkan penelitian di daerah New Zaeland yang dituliskan seperti Pers. (1) dan (2) berikut :

$$M_m = b + aM_p \quad (1)$$

$$\log T_p = d + cM_p \quad (2)$$

Dengan M_m adalah besarnya perkiraan magnitudo gempabumi utama yang akan terjadi, M_p adalah nilai rata-rata dua magnitudo terbesar yang terjadi selama periode anomali peningkatan seismisitas (*swarm*), T_p adalah lama waktu terjadi periode anomali peningkatan seismisitas (*swarm*) sampai terjadi gempabumi utama (dalam hari), sedangkan a , b , c , dan d adalah konstanta.

Jika ditulis dalam bentuk persamaan linier secara umum, dapat ditulis seperti Pers. (3) :

$$Y = m_1 + m_2X \quad (3)$$

Dengan menggunakan solusi regresi linier berbobot, parameter model (m_1 dan m_2) dapat diselesaikan dengan Pers. (4) :

$$m = [G^T W_s G]^{-1} G^T W_s D \quad (4)$$

Dengan G adalah matriks kernel, W_s adalah matriks pembobotan dengan elemen diagonal adalah varian data, dan D adalah matriks data.

Berdasarkan penelitian Evison *et al* [18] untuk gempabumi daerah New Zaeland didapat konstanta $a = 1,04$, $b = 1,52$, $c = 0,51$, dan $d = 0,64$. Evison juga meneliti gempabumi daerah Jepang dan didapat konstanta a , b , c , dan d berturut-turut 0,72; 2,73; 0,37; dan 1,61.

Singh *et al*. [19] juga meneliti pola atau karakteristik kegempaan sebelum terjadi gempabumi signifikan di daerah Barat Nepal, India. Berdasarkan hasil penelitian ini, karakteristik kegempaan di wilayah Nepal terdapat pola yang menarik yaitu selalu diikuti dengan siklus kegempaan yang terdiri dari siklus normal (N), anomali seismisitas atau peningkatan aktivitas seismisitas (*swarm*) (A), penurunan aktivitas seismik (*precursory gap*) (G), dan diikuti gempabumi utama. Dari kajian ini didapat hubungan antara gempabumi utama terhadap magnitudo rata-rata saat terjadi *swarm* serta hubungan antara besarnya magnitudo utama (M_m) untuk daerah Nepal yang dirumuskan seperti Pers. (5), (6), dan (7) berikut :

$$M_m = 1,05M_p + 0,60 \quad (5)$$

$$\log T_p = 0,59M_p + 0,08 \quad (6)$$

$$M_m = 1,92\log T_p + 0,01 \quad (7)$$

Formula ini memberikan prediksi besaran magnitudo gempabumi utama yang akan terjadi jika durasi T_p dan magitudo rata-rata M_p selama periode *swarm* diketahui. Formula ini memberikan hasil yang cukup baik jika selama masa periode anomali *swarm* tidak ada gempabumi yang terjadi dengan magnitudo lebih besar atau sama dengan magnitudo M_p . Berdasarkan penelitian Singh *et al.* [20] rangkaian gempabumi *swarm* terjadi pada area yang akan menjadi zona *rupture* gempabumi utama yang akan terjadi.

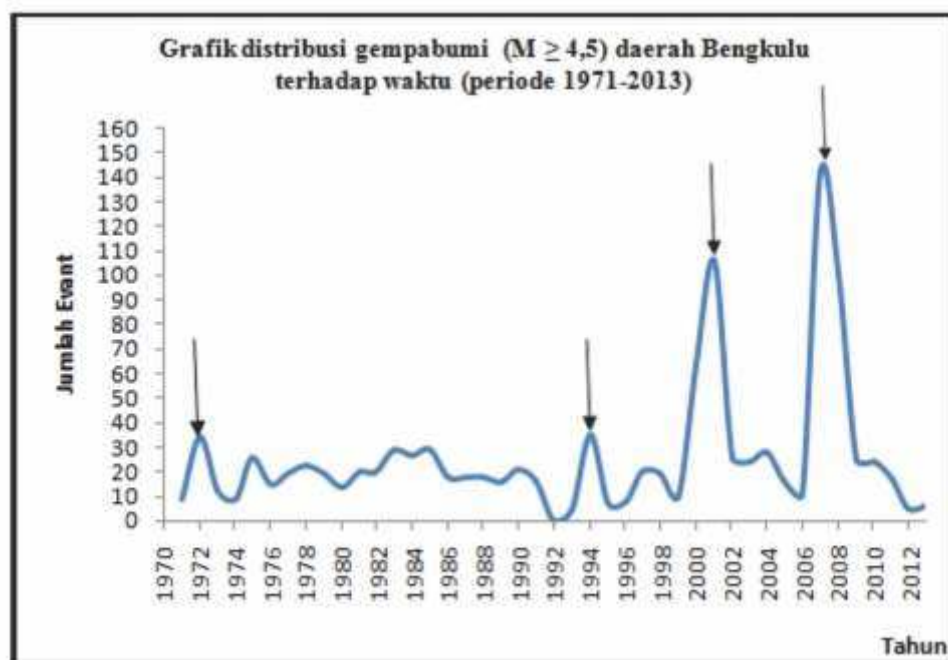
Setelah terjadi rangkaian gempabumi *swarm* atau peningkatan aktivitas seismisitas, periode selanjutnya diikuti dengan periode penurunan aktivitas (*seismic quiescence*) yang merupakan periode pengumpulan energi atau akumulasi stress sampai terjadi gempabumi utama. Lamanya waktu (dalam hari) terjadinya aktivitas *swarm* dijadikan sebagai parameter untuk mengestimasi besarnya gempabumi utama yang akan terjadi berdasarkan persamaan hubungan antara M_m dan T_p atau hubungan antara M_m dan M_p .

3. Hasil dan Pembahasan

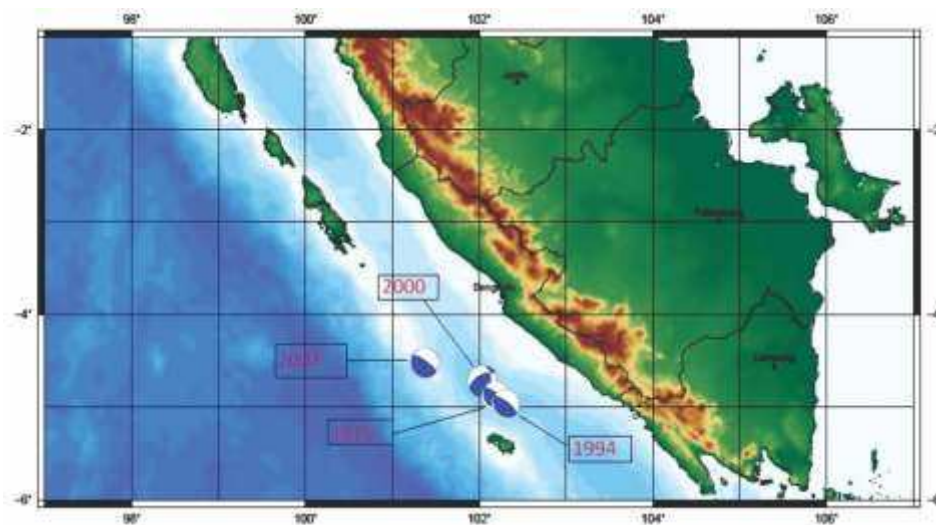
Berdasarkan hasil pengolahan data katalog gempabumi daerah Bengkulu tahun 1971 hingga

2013, terdapat pola yang menarik sebelum terjadi gempabumi utama ($M \geq 7,0$). Pola atau siklus yang terjadi adalah dimulai dari aktivitas normal, kemudian diikuti dengan anomali seismisitas dengan indikasi peningkatan seismisitas (*swarm*), periode selanjutnya adalah periode penurunan aktivitas seismisitas atau *seismic quiescence* (*precursory gap*), dan periode selanjutnya adalah periode terjadinya gempabumi utama. Pola ini ditampilkan pada Gambar 2.

Pada Gambar 2 diperlihatkan bahwa sebelum terjadi gempabumi utama tahun 1975, 1994, 2000, dan 2007 yang ditandai panah hitam selalu didahului oleh siklus kegempaan atau pola seismisitas. Pola ini didahului dengan aktivitas kenaikan seismisitas, selanjutnya penurunan aktivitas seismisitas, dan terakhir terjadinya gempabumi utama. Lamanya priode tiap-tiap siklus cukup bervariasi. Lokasi episenter empat gempabumi signifikan ini diperlihatkan pada Gambar 3. Dapat dilihat pada Gambar 3, empat gempa ini terletak pada zona satu zona *rupture*.



Gambar 2. Grafik distribusi gempabumi ($M \geq 4,5$) serta siklus kegempaan sebelum gempabumi utama $M \geq 7,0$ daerah Bengkulu periode tahun 1971-2013.



Gambar 3. Lokasi empat gempabumi signifikan $M \geq 7,0$ daerah Bengkulu pada tahun 1975, 1994, 2000, dan 2007.

Untuk mempelajari pola kegempaan sebelum terjadi gempabumi utama pada tahun 1975, 1994, 2000, dan 2007 ini akan dijabarkan melalui pembahasan berikut ini.

Karakteristik Kegempaan Sebelum Gempabumi 1 Oktober 1975 ($M = 7,0$). Gempabumi 1 Oktober 1975 terletak pada koordinat 4,88 LS 102,19 BT dengan kedalaman 33 km. Sebelum terjadi gempabumi utama tanggal 1 Oktober 1975 dengan kekuatan $M = 7,0$ ini, siklus kegempaan dimulai dari periode normal selama periode 1 Januari 1971 hingga 31 Desember 1971 (365 hari) gempabumi dengan kekuatan $M \geq 4,5$ hanya terjadi 9 event. Siklus selanjutnya diikuti dengan periode peningkatan aktivitas seismisitas (*swarm*) selama 1 Januari 1972 hingga 31 Januari 1972 (365 hari) terjadi gempabumi dengan kekuatan $M \geq 4,5$ sebanyak 34 event. Setelah periode *swarm*, siklus selanjutnya adalah *seismic quiescence* yang ditandai dengan penurunan aktivitas kegempaan. Periode ini berlangsung selama 1 Januari 1973 hingga 30 September 1975 (635 hari) jumlah event $M \geq 4,5$ yang terjadi pada periode ini hanya 20 event seperti diperlihatkan pada Tabel 1. Selama

periode *swarm*, dua gempabumi terbesar yang terjadi adalah $M = 6,0$ dan $M = 5,4$ sehingga magnitudo rata-rata (M_p) adalah $M = 5,7$.

Karakteristik Kegempaan Sebelum Gempabumi 15 Februari 1994 ($M = 7,0$). Gempabumi 15 Februari 1994 berkekuatan 7,0 terletak pada koordinat 4,97 LS 102,30 BT dengan kedalaman 23 km. Sama seperti siklus gempabumi tanggal 1 Oktober 1975, sebelum terjadi gempabumi 15 Februari 1994 juga mengikuti pola yang sama. Dimulai dari periode normal, yaitu selama 1 Januari 1976 – 31 Desember 1981 (2190 hari) jumlah event ($M \geq 4,5$) yang terjadi 110 event, kemudian diikuti periode *swarm* atau peningkatan aktivitas seismisitas dimana pada periode 1 Januari 1982 – 31 Januari 1985 (1460 hari) jumlah event yang terjadi mencapai 105 event, selama periode ini dua magnitudo terbesar yang terjadi dengan kekuatan 6,6 dan 6,5 dengan $M_p = 6,55$. Periode *seismic quiescence* terjadi selama 1 Januari 1986 – 14 Februari 1994 (2920 hari) jumlah event yang terjadi sebanyak 112. Karakteristik kegempaan sebelum gempabumi 15 Februari 1994 dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Karakteristik kegempaan daerah Bengkulu ($M \geq 4,5$) sebelum terjadi gempabumi tanggal 1 Oktober 1975, $M = 7,0$. [21]

Seismic episodes	Duration	Days	Total Events	Level of Activity
Normal/background (N)	1 Januari 1971-31 Desember 1971	365	9	Low
Anomalous/swarm (A)	1 Januari-31 Desember 1972	365	34	High
Precursory gap (G)	1 Januari 1973-30 September 1974	635	20	Low
Main-shock sequence (M)	1 Oktober 1975-31 Desember 1975			-

Tabel 2. Karakteristik kegempaan daerah Bengkulu ($M \geq 4,5$) sebelum terjadi gempabumi tanggal 15 Februari 1994, $M = 7,0$ (sumber : <http://earthquake.usgs.gov>) [21].

Seismic episodes	Duration	Days	Total Events	Level of Activity
Normal/backgroun (N)	1 Januari 1976-31 Desember 1981	2190	110	Low
Anomalous/swarm (A)	1 Januari 1982-31 Desember 1985	1460	105	High
Precursory gap (G)	1 Januari 1986-14 Februari 1994	2920	112	Low
Main-shock sequence (M)	15 Februari 1994-31 Desember 1994			-

Karakteristik Kegempaan Sebelum Gempabumi 4 Juni 2000 ($M = 7,9$). Gempabumi tanggal 4 Juni 2000 merupakan salah satu gempabumi yang menyebabkan banyak korban jika kerusakan di daerah Bengkulu. Gempabumi ini terletak pada koordinat 4,72 LS 102,04 BT pada kedalaman 33 km. Lima tahun sebelum terjadi gempabumi utama, terindikasi adanya siklus yang teratur sebagai prekursor gempabumi ini. Dimulai dari periode normal selama dua tahun, 1 Januari 1995 – 31 Desember 1996 (730 hari) gempabumi dengan kekuatan $M \geq 4,5$ hanya 15 event. Setelah periode normal ini, kemudian diikuti dengan periode anomali seismisitas atau peningkatan aktivitas seismik (*swarm*) selama satu tahun mulai 1 Januari 1997 – 31 Desember 1997 (365 hari) jumlah event $M \geq 4,5$ yang terjadi sebanyak 39 event dengan $M_p = 6,5$. Setelah periode swarm, kemudian diikuti periode penurunan aktivitas seismik (*precursory gap*) selama 1 Januari 1998 – 3 Juni 2000 (515 hari) dengan jumlah event $M \geq 4,5$ hanya 13 event. Secara lengkap karekteristik kegempaan sebelum terjadi gempabumi tanggal 4 Juni 2000 ditabelkan pada Tabel 3.

Karakteristik Kegempaan Sebelum Gempabumi 12 September 2007 ($M = 8,5$). Gempabumi tanggal 12 September 2007 dengan kekuatan 8,5 Mw merupakan gempabumi besar yang juga mengakibatkan kerusakan di daerah Bengkulu. Gempabumi ini terlatak pada koordinat 4,52 LS 101,37 BT pada kedalaman 34 km. Dilihat dari siklus seismik, pola kegempaan sebelum terjadi gempabumi utama berbeda dengan tiga gempabumi signifikan sebelumnya. Tabel 4 menyajikan karakteristik kegempaan sebelum terjadi gempabumi utama 12 September 2007. Pada tabel dapat dilihat, sebelum gempabumi utama hanya ada dua siklus yaitu siklus anomali peningkatan aktivitas seismik (*swarm*) dan siklus penurunan aktivitas seismik (*precursory gap*). Periode anomali *swarm* (A) berlangsung selama 1 Januari 2001 – 31 Desember 2004 (1460) dengan total event $M \geq 4,5$ yang terjadi sebanyak 184 event, dan $M_p = 7,1$. Periode penurunan aktivitas seismisitas (*precursory gap*) berlangsung selama 1 Januari 2005 – 11 September 2007 (981 hari) dengan total event $M \geq 4,5$ yang terjadi hanya 36 event. Setelah periode *seismic quiescence*, tepat pada tanggal 12 September 2007 terjadi gempabumi utama (M_m) dengan kekuatan 8,5 Mw.

Tabel 3. Karakteristik kegempaan daerah Bengkulu ($M \geq 4,5$) sebelum terjadi gempabumi tanggal 4 Juni 2000, $M = 7,9$. [21]

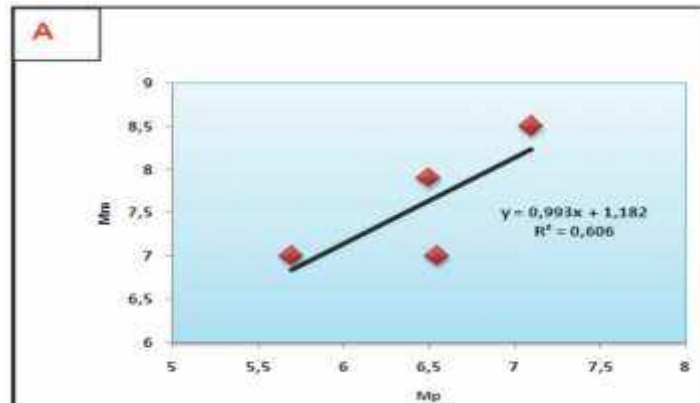
Seismic episodes	Duration	Days	Total Events	Level of Activity
Normal/backgroun (N)	1 Januari 1995-31 Desember 1996	730	15	Low
Anomalous/swarm (A)	1 Januari 1997-31 Desember 1997	365	39	High
Precursory gap (G)	1 Januari 1998-3 Juni 2000	515	13	Low
Main-shock sequence (M)	4 Juni 2000-31 Desember 2000			-

Tabel 4. Karakteristik kegempaan daerah Bengkulu ($M \geq 4,5$) sebelum terjadi gempabumi tanggal 12 September 2007, $M = 8,5$. [21]

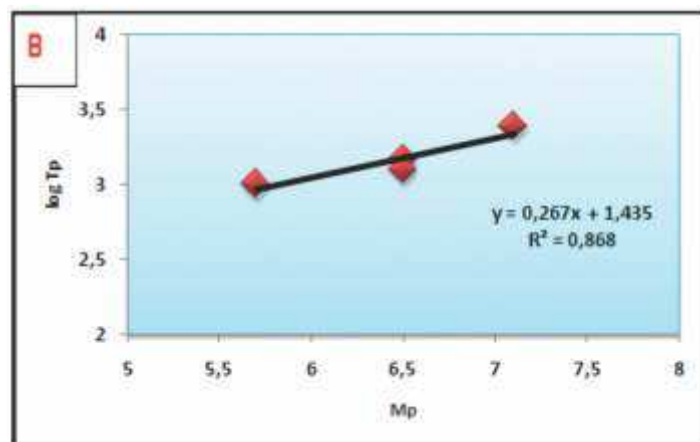
Seismic episodes	Duration	Days	Total Events	Level of Activity
Anomalous/swarm (A)	1 Januari 2001-31 Desember 2004	1460	184	High
Precursory gap (G)	1 Januari 2005-11 September 2007	981	36	Low
Main-shock sequence (M)	12 Sept 2007-31 Desember 2008			-

Regresi Formula Perkiraan Magnitudo Gempabumi di Wilayah Bengkulu (*Predictive Regressions*). Berdasarkan parameter masing-masing karakteristik kegempaan sebelum terjadi gempabumi utama, maka bisa dihitung formula yang menyatakan hubungan antara magnitudo rata-rata saat terjadi periode *swarm* (M_p) terhadap lamanya

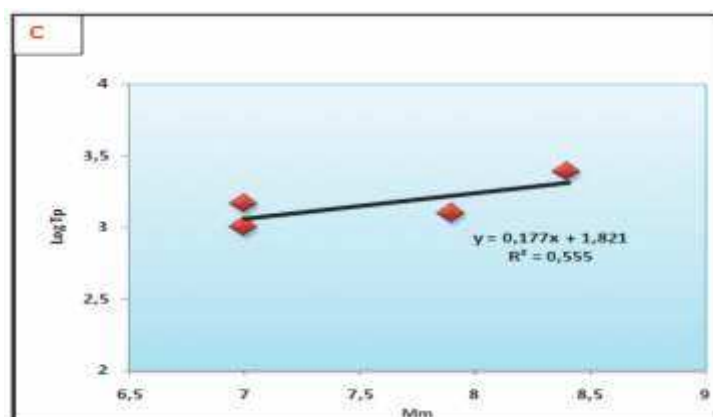
periode *swarm* (T_p). Begitu juga dengan hubungan antara magnitudo gempabumi utama yang akan datang (M_m) terhadap magnitudo rata-rata saat periode *swarm* (M_p), serta hubungan antara T_p dan M_m dapat kita hitung dengan metode *lest square*. Pada Gambar 4 di bawah ini memperlihatkan hasil perhitungan yang telah dilakukan:



Gambar 4(a). Kurva hubungan antara M_m (magnitudo gempabumi utama) dan M_p (nilai rata-rata dua magnitudo terbesar yang terjadi selama masa *swarm*) dengan nilai $R = 0,606$.



Gambar 4(b). Kurva hubungan antara M_p (nilai rata-rata dua magnitudo terbesar yang terjadi selama masa *swarm*) dan T_p (lamanya periode *swarm*) dengan nilai $R = 0,868$.



Gambar 4(c). Kurva hubungan antara M_m (magnitudo gempabumi utama) dan $\log T_p$ (lama waktu terjadinya periode *swarm*) dengan nilai $R = 0,555$.

Dari Gambar 4 diperlihatkan hasil perhitungan model kegempaan di wilayah Bengkulu yang dapat ditulis seperti pada Pers. (8), (9), dan (10) berikut :

$$M_m = 0,993M_p + 1,182; (r = 0,606) \quad (8)$$

$$\log T_p = 0,267M_p + 1,435; (r = 0,868) \quad (9)$$

$$\log T_p = 0,177M_m + 1,822; (r = 0,555) \quad (10)$$

Persamaan (8) dan (10) memperlihatkan bahwa estimasi besarnya magnitudo gempabumi utama (M_m) diwaktu yang akan datang dapat dicari jika M_p dan T_p diketahui. Artinya dugaan besarnya magnitudo gempabumi utama bisa dihitung jika siklus kegempaan pada periode *swarm* telah dilewati sebelum terjadinya gempabumi utama.

Secara teoritis, estimasi besarnya magnitudo utama yang akan terjadi akan lebih bagus jika menggunakan Pers. (8) yaitu hubungan antara magnitudo gempa utama (M_m) dengan magnitudo rata-rata selama periode *swarm* (M_p). Hal ini dikarenakan koefisien regresi (r) persamaan (8) lebih besar daripada koefisien regresi Pers. (10). Koefisien regresi yang besar (maksimum 1 atau -1) mengindikasikan korelasi antara dua variabel yang kuat. Seperti diperlihatkan pada persamaan (9) yang memiliki koefisien regresi 0,868. Nilai yang mendekati 1 ini menunjukkan bahwa korelasi antara T_p dan M_p sangat kuat.

Pada dasarnya Pers. (8) dan (10) bisa kita gunakan untuk mengestimasi besarnya magnitudo gempabumi utama yang akan datang dengan kondisi hanya berlaku jika pada masa siklus senyap atau penurunan aktivitas kegempaan (*precursory gap*) tidak ada gempabumi dengan magnitudo lebih besar atau sama dengan magnitudo M_p . Dengan adanya magnitudo yang lebih besar atau sama dengan M_p pada saat periode *precursory gap* berarti akan mengurangi akumulasi stress pada patahan. Kondisi ini akan memperpanjang siklus *precursory gap* yang akan mengakibatkan peluang terjadinya gempabumi utama (M_m) dengan magnitudo yang lebih besar. Jika kondisi ini terjadi maka diperlukan pertimbangan dan faktor lain untuk mengestimasi besarnya magnitudo gempabumi utama (M_m). Besarnya magnitudo gempabumi utama berbanding lurus dengan logaritma lamanya waktu periode terjadinya prekursor (sejak terjadi periode *swarm* hingga terjadi gempabumi utama). Persamaan (10) dan Gambar 4(c) memperlihatkan hubungan linier antara M_m terhadap T_p . Pola anomali seismisitas dan relasi

antara M_m dan T_p ini bisa dijadikan salah satu metode untuk dijadikan sebagai prekursor gempabumi jangka panjang.

Karakteristik Kegempaan Daerah Bengkulu Saat Ini. Periode terjadinya gempabumi utama 12 September 2007 beserta gempabumi susulannya berlangsung cukup lama hingga mencapai akhir tahun 2008. Hal ini dapat dilihat dari aktivitas kegempaan $M \geq 4,5$ masih tergolong tinggi dengan total event yang terjadi mencapai 133 event pada tahun 2007, dan 100 event pada tahun 2008. Periode *swarm* dimulai sejak 1 Januari 2009 hingga 31 Desember 2011. Dalam waktu dua tahun ini (730 hari) jumlah event $M \geq 4,5$ tercatat sebanyak 184 event dengan $M_p = 6,4$. Periode penurunan aktivitas seismik (*precursory gap*) terindikasi sejak 1 Januari 2012 hingga sekarang. Dalam rentang waktu dua tahun ini (730 hari) jumlah event $M \geq 4,5$ yang tercatat hanya 11 event. Periode ini dapat diinterpretasikan sebagai periode pengumpulan energi atau akumulasi *stress* seperti ditampilkan pada Tabel 5.

Dari formula yang sudah dihitung di atas, maka wilayah Bengkulu saat ini diperkirakan memiliki potensi gempabumi dengan kekuatan $M > 7,5$. Beberapa hasil penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa setelah terjadi gempabumi 12 September 2007, saat ini di kawasan Bengkulu dalam tahap akumulasi energi. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Rohadi *et al.* [22] yang melakukan perhitungan *b-value* baik secara temporal maupun spasial di seluruh kawasan pantai barat Sumatera periode tahun 1973–2008.

Hasilnya menunjukkan bahwa di wilayah Bengkulu khususnya di wilayah *rupture zone* gempabumi 12 September 2007 memiliki nilai *b-value* yang rendah. Wilayah dengan *b-value* rendah ini berpotensi terjadinya gempabumi besar diwaktu yang akan datang.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Ardiansyah [23] yang mengkalkulasi perubahan tegangan Coulomb oleh gempabumi Bengkulu tanggal 4 Juni 2000, 12 dan 13 September 2007. Hasilnya menunjukkan bahwa, setelah terjadi rangkaian gempabumi signifikan ini, wilayah Bengkulu dan sekitarnya masih memiliki akumulasi stress yang tinggi yang suatu waktu bisa dilepaskan dalam bentuk gempabumi signifikan.

Tabel 5. Karakteristik kegempaan daerah Bengkulu ($M \geq 4,5$) saat ini. Periode 13 September 2007-31 Desember 2013 [21].

Seismic episodes	Duration	Days	Total Events	Level of Activity
Normal/background (N)	13 Sept 2007-31 Desember 2008	Main-shock sequence	12 Sept 2007	
Anomalous/swarm (A)	1 Januari 2009-31 Desember 2011	730	184	High
Precursory gap (G)	1 Januari 2012 to continuing	730	11	Low
Main-shock sequence (M)	Not Yet Occurred			

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisa katalog data gempabumi periode 1971-2013 di daerah Bengkulu, telah terindikasi adanya pola atau siklus yang teratur sebelum terjadinya gempabumi utama yang signifikan. Siklus ini mengikuti pola meliputi periode normal (N), periode anomali peningkatan seismisitas (N), periode penurunan aktivitas seismik atau *precursory gap* (G), dan periode terjadinya gempabumi utama (M). Siklus kegempaan di daerah Bengkulu saat ini dalam periode *precursory gap* (G) atau periode penurunan aktivitas seismik. Berdasarkan perhitungan menggunakan formula hubungan antara M_p , M_m , dan T_p yang telah didapat, maka saat ini daerah Bengkulu diperkirakan menyimpan potensi gempabumi dengan kekuatan $M > 7,5$.

Daftar Pustaka

- [1] Rikitake, T. (1976). *Earthquake Prediction*. Elsevier Amsterdam, 257 pp.
- [2] Rikitake, T. (1982). *Earthquake Forecasting and Warning*. Center for Academic Publications Japan 3, 402 pp.
- [3] Lay, T, & T.C Wallace. (1995). *Modern Global Seismology*, Vol 58, International Geophysics Series. San Diego: Academic Press.
- [4] Sekiya, H. (1977). Anomalous Seismic Activity and Earthquake Prediction . *Journal Physical Earth*, 25, 85-93.
- [5] Ishida, M, & H. Kanamori. (1977). The Spatio-Temporal Variations of Seismicity Before the 1971 San Fernando Earthquake-California. *Geophys Res Lett*, 4, 345-346.
- [6] Marza, V.I. (1979). A Seismicity Pattern of March 4, 1977 Vrancea, Romania Earthquake : An Earthquake Prediction Insight. *Tectonophysics*, 53, 217-222.
- [7] Habermann, R.E, & M. Wyss. (1987). Reply to "Comment on Habermann's Methode for Detecting Seismicity Rate Changes" by M.W.Matthes and P. Resenberg. *Journal Geophysics Research* 92, 9446-9450.
- [8] Habermann, R.E. (1988). Precursory Seismic Quiescence : Pats, Present, and Future. *Pure and Appl Geophysics*, 126, 279-318.
- [9] Mogi, K. (1985). *Earthquake Prediction*, San Diego: Academic Press, 355 pp.
- [10] Mignan, A., & Rita Di Giovambattista. (2008). Relationship Between Accelerating Seismicity and Quiescence, Two Precursors to Large Earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 35, L15306.
- [11] Paudyal, Harihar. (2005). Fluctuation of Seismic Activity Associated With 1999 Chamoli Earthquake. *The Himalayan Physics*, 2, 11-15.
- [12] Bullen, K.E, & B.A Bolt. (1985). *An Introduction to the Theory of Seismology*. Cambridge University Press, 499 pp.
- [13] Evison, F.F. (1977). The Precursory Earthquake Swarm. *Physical Earth Planet Inter*, 15, 19-23.
- [14] Evison, F.F. (1977). Fluctuation of Seismicity Before Major Earthquake. *Nature*, 266, 710-712.
- [15] Gupta, H.K, & H.N Singh. (1986). Seismicity of Northeast India Region : Part II : Earthquake Swarms Precursory to Moderate Magnitude to Great Earthquakes. *Journal Geology Soc India*, 28, 367-406.
- [16] Zona Rupture Gempa Bengkulu 4 Juni 2000. (2010). <http://www.dbripteck.ristek.go.id/cgi/penjaga.cgi?tampildetil&publikasi&1111879394&1086>, diakses tanggal 17 Desember 2013.
- [17] Evison, F.F. (1982). Generalized Precursory swarm Hypothesis. *Journal Physical Earth*, 30, 155-170.
- [18] Evison, F.F, & D.A Rhodes. (1997). The Precursory Earthquake in New Zealand : Hypothesis Test II. *NZ Jurnal Geology Geophysic*, 40, 537-547.
- [19] Singh, H.N., H.Paudyal., D.Shanker., A.Panthi., A.Kumar., & V.P.Singh. (2010). Anomalous Seismicity and Earthquake Forecast in Western Nepal Himalaya and its Adjoining In Region. *Pure and Applied Geophysics*. 167, 667-684.
- [20] Singh, V.P., & Singh, H.N. (1984). Precursory Swarm and Medium Size Earthquake Occurrences in Pamirs and its Adjoining Regions. *Earthq Predict Res.*, 2, 245-258.
- [21] Source Parameter Search. (2013). (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarc/hives/sopar/>), diakses 29 Desember 2013.

[22]Rohadi, Supriyanto, Hendra Grandis, & Mezak A Ratag. (2008). Studi Potensi Seismotektonik Sebagai Prekursor Tingkat Kegempaan Di Wilayah Sumatera. Jurnal Meteorologi dan Geofisika, 9(2), 65-77.

[23]Ardiansyah, Sabar. (2014). Kajian Jejak Coulomb Static Stress Change dan Lokasi Gempabumi Signifikan Daerah Bengkulu (Periode Tahun 2000-2007). Jurnal Ilmu Fisika Indonesia, 2(1), 10-14.