

**ERUPSI GUNUNGAPI KELUD DAN NILAI-B
GEMPABUMI DI SEKITARNYA**
(Eruption of The Kelud Volcano and b-Value of Its Surrounding Earthquakes)

Kirbani Sri Brotopuspito dan Wahyudi

Laboratorium Geofisika, Jurusan Fisika FMIPA, UGM, Sekip Utara, Kotak Pos BLS 21, Yogyakarta 55281
email: kirbani@ugm.ac.id; kirbani@yahoo.com

ABSTRAK

Kegiatan erupsi Gunungapi Kelud (G. Kelud) di Jawa Timur dengan koordinat 7,9° Lintang Selatan (LS); 112,8° Bujur Timur (BT) tercatat secara baik dari tahun 1000. Sejak tahun 1000 sampai dengan tahun 2007 telah terjadi 31 erupsi dengan 15377 korban jiwa meninggal dunia. Kantung magma tunggal G. Kelud, yang diperkirakan dengan interpretasi data gravitasi, berada pada kedalaman 1 (satu) kilometer di bawah dasar kawahnya. Runtun waktu istirahat erupsi G. Kelud secara statistik mempunyai distribusi eksponensial Poissonian dengan koefisien atenuasi eksponensial $\lambda = 0,0413/\text{tahun}$ atau waktu istirahat erupsi rerata $t = 24,21$ tahun, yang tidak dapat dimaknai bahwa setiap 24,21 tahun selalu terjadi erupsi. Gejala kejadian erupsi G. Kelud yang mempunyai distribusi statistik eksponensial Poissonian pada dasarnya adalah gejala yang bersifat acak (*stochastically random*) dan ini sesuai dengan dimensi korelasi hasil analisis fraktal yang bernilai mendekati 4,5. Pada tahun 2007 ini G. Kelud telah mempunyai waktu istirahat erupsi selama 17 tahun sejak erupsi dengan V.E.I. (*Volcano Explosivity Index*) = 4 pada 1990 dan mempunyai kebolehjadian terjadinya erupsi 65,2% dengan aras keyakinan 95%. Nilai-b gempabumi di sekitar G. Kelud dihitung pada kawasan yang dibatasi garis lintang 3LS dan 17LS serta garis bujur 111,8BT dan 112,8BT. Runtun waktu gempabumi dari 1973 sampai dengan sebelum erupsi 1990 mempunyai nilai-b = 0,8817, gempabumi setelah erupsi 1990 sampai dengan 2007 mempunyai nilai-b = 1,0147, dan keseluruhan gempabumi 1973-2007 mempunyai nilai-b = 1,0032. Rendahnya nilai-b menjelang erupsi G. Kelud 1990 dapat diterangkan dengan adanya gejala penimbunan tegangan (*stress accumulation*) yang disertai dengan gejala adanya peningkatan kelajuan retakan atau ketidakstabilan pertumbuhan retakan-retakan baru yang diakhiri dengan erupsi (*catastrophic failure*). Kenaikan nilai-b setelah terjadinya erupsi G. Kelud 1990 ini juga dapat dimengerti, karena erupsi gunungapi juga merupakan gejala pelepasan tegangan (*stress release*) yang diikuti dengan lambatnya tingkat pertumbuhan retakan.

Kata kunci: Erupsi, Gunungapi Kelud, Statistik, Fraktal, Gempabumi, Nilai-b

ABSTRACT

Volcanic eruption activities of the Kelud volcano (Mt. Kelud: 7.9S; 112.3E) in the Eastern Java were well recorded since 1000. Thirty one eruptions were recorded since 1000 to 2007, which resulted to 15377 people died. Mt. Kelud magma chamber was estimated by gravity data interpretation is located in a depth of about 1 km beneath the bottom of its crater lake. Eruption's repose time series of Mt. Kelud statistically has a Poisson exponential distribution

with an attenuation coefficient $l = 0,0413$ per year i.e. repose time average $t = 24,21$ years, which does not mean that Mt. Kelud in every 24.21 years always erupt. Occurrence of eruptions with statistical Poisson exponential distribution e.g. a stochastically random events has been emphasized by result of a fractal analysis which shown correlation dimension number about 4.5. In 2007, Mt. Kelud, from its 1990 eruption with Volcano Explosivity Index (V.E.I.)=4, has eruption's repose time 17 years, and has 65.2% probability of having eruption, with confidence level 95%. b-value of earthquakes in surrounding Mt. Kelud is calculated in the area between latitude lines 3S and 17S as well as between longitude lines 111.8E and 112.8E. Earthquakes time series since 1973 until before the 1990 eruption has b-value 0.8817, after the 1990 eruption to 2007 has b-value 1.0147, the total 1973-2007 earthquakes has b-value 1.0032. Lower b-value in the episode before the 1990 Kelud eruption means there was stress accumulation followed by faster cracks growing rate or unstable cracks growth which finalized by the eruption i.e. catastrophic failure. Higher b-value in the episode after the eruption can be understood as after stress released during eruption is naturally followed by slower cracks growing rate.

Keywords: Eruption, Kelud Volcano, Statistics, Fractal, Earthquakes, b-value

Makalah diterima 3 September 2007

1. PENDAHULUAN

Gunungapi Kelud ($7^{\circ} 56' S$ dan $112^{\circ} 18' E$) adalah gunungapi strato aktif yang berlokasi di Kediri, Jawa Timur. Gunung ini memiliki ketinggian puncak 1731 m di atas permukaan laut, dan mempunyai danau kawah pada puncaknya dengan volume air 40 juta m^3 dan bersuhu $32 - 35^{\circ}C$ dengan PH 5,1, sebelum erupsi tahun 1990. Menurut catatan sejarah aktivitas G. Kelud sejak tahun 1000 hingga 1990, erupsi tahun 1586 tercatat sebagai erupsi yang menelan korban jiwa paling besar (10.000 orang), dan sejak abad 20 G. Kelud telah menelan korban jiwa sebanyak 5.377 orang. Pada bulan September 2007, G. Kelud menampilkan tanda-tanda adanya kenaikan aktivitas akan terjadinya letusan, setelah beristirahat selama 17 tahun, sejak letusan terakhir pada tahun 1990.

Pada tulisan ini akan diulas sedikit tentang sejarah geologi dan geofisika, serta bahaya erupsi G. Kelud. Di samping itu suatu kajian statistik dilakukan terhadap runtun waktu dari waktu istirahat (*repose period*) G. Kelud dari tahun 1000 hingga 1990, dan runtun waktu kejadian gempa bumi yang terjadi di sekitar G. Kelud pada kurun waktu 1973 hingga 2007.

2. TINJAUAN GEOLOGI DAN GEOFISIKA

G. Kelud merupakan salah satu gunungapi kuarter yang berkembang di Jawa Timur. G. Kelud dikelilingi oleh beberapa gunungapi yang lebih tua, seperti G. Kawi dan G. Butak di sebelah timur, serta G. Anjasmoro di sebelah timur laut (Gambar 1).



Gambar 1. Foto G. Kelud (Isa)

Gunung-gunung tersebut membentuk morfologi kasar dengan bukit dan jurang yang terjal di timur laut dan di lereng timur G. Kelud. Morfologi G. Kelud dapat dibagi dalam 5 unit,

yaitu puncak dan kawah G. Kelud, badan Kelud, cekungan parasitik Kelud, kaki dan dataran Kelud, serta perbukitan di sekitarnya. Puncak dan kawah G. Kelud mempunyai ketinggian lebih dari 1000m dpl, dan mempunyai morfologi yang tidak teratur. Hal ini disebabkan adanya erupsi yang bersifat eksplosif yang diikuti dengan pembentukan kubah lava. Puncak Kelud (1731m), Sumbing (1518m), Lirang (1414m), Gajahmungkur (1488m) dan Kombang (1514m) merupakan kubah ekstrusif dengan kemiringan rata-rata > 40°. Beberapa kawah lama juga dijumpai di sekitar danau kawah di puncak G. kelud. Formasi kawah-kawah tersebut kemungkinan menyebabkan bentuk puncak G. Kelud yang sangat tidak teratur. Beberapa kawah tersebut ialah Lirang, Gajahmungkur, Tumpak, Sumbing I, Sumbing II, Dargo, Gupit, Badak I, Badak II dan Kelud. Satuan kawah ini menunjukkan adanya pola *stream* radial dengan bentuk V.

Stratigrafi dari satuan batuan G. Kelud terdiri dari berbagai macam aliran lava, kubah lava, aliran piroklastik dan timbunan piroklastik lembut. Batuan pra-Kelud terdiri dari batuan vulkanik dari Pegunungan Selatan, G. Anjasmoro, G. Butak dan G. Kawi. Timbunan sekunder terdiri dari lahar dingin dan kolovium.

Struktur geologi G. Kelud di samping terdiri dari 10 kawah tersebut di atas, juga terdapat 32 patahan normal. Kesepuluh kawah tersebut umurnya berurutan dari yang tertua (kawah Lirang) hingga termuda (kawah Kelud), dan merupakan pusat erupsi yang berpindah-pindah berlawanan arah jarum jam. Masing-masing erupsinya menghasilkan batuan piroklastik, dan pada umumnya merusak sebagian kawah lama. Hal ini menunjukkan bahwa erupsi G. Kelud bersifat eksplosif. Secara petrografis, batuan vulkanik G. Kelud dapat diklasifikasikan sebagai calc-alkaline dan berkembang dari K basalt medium ke K andesit medium ($\text{SiO}_2 = 49\%$ hingga 61%).

Sejak tahun 1960, Direktorat Vulkanologi telah memasang seismograf (tipe Hosaka) di G. Kelud, yang terdiri dari 3 buah seismo-meter. Di observatorium G. Kelud

Margo-mulyo sejak 1996 juga telah dipasang 3 seismograf dengan sistem telemetri, dengan seismometer terpasang di G. Lirang, terowongan Kelud, dan dekat G. Sumbing.

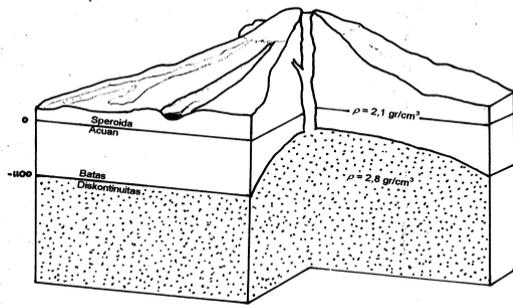
Beberapa tipe gempa vulkanik tercatat selama berlangsungnya pemantauan seismisitas G. kelud. Tipe-tipe VK-1, VK-2, VK-3 dan VK-4 (VK=Volcanic Kelud) tercatat dengan interval waktu rambat gelombang S-P antara 1 sampai dengan 4 sekon, dengan kandungan frekuensi sekitar 3 hertz. Hal ini berarti hiposenter berada pada posisi yang cukup dekat dengan permukaan.

Distribusi hiposenter dari gempa-gempa vulkanik yang terjadi posisinya berada pada kedalaman maksimum 6 km ke arah barat G. Kelud, dan berada di luar area puncak maupun bibir kawah G. kelud. Daerah seismik teridentifikasi berada di bawah danau kawah Kelud pada kedalaman 4 hingga 6 km. Hal ini dapat diinterpretasikan sebagai puncak dari badan magma. Suatu model bawah permukaan G. Kelud yang digambarkan berdasarkan anomali gravitasi dapat dilihat pada Gambar 2.

Bahaya utama letusan G. Kelud adalah terjadinya erupsi lahar atau biasa disebut lahar utama. Lahar ini dihasilkan dari hancurnya danau kawah bercampur dengan material halus seperti debu, pasir, lapili dan bom membentuk lahar yang bersuhu tinggi. Lahar ini mengalir ke arah kaki dan lereng gunung serta dataran rendah. Pada letusan tahun 1919, volume air danau kawah mencapai 40 juta m³ dan merusak sebagian kota Blitar, yang terdiri dari 104 desa dengan 9.000 rumah dan menelan korban jiwa sebanyak 5.110 orang.

Pada letusan 1951 dengan volume air di danau kawah sekitar 1 juta m³, lahar utama yang dihasilkan mengalir hingga jarak 6,5 km, sedangkan pada erupsi 1966 dengan volume air 20,3 juta m³ mencapai jarak 31 km, dengan laju aliran rata-rata 25 km/jam. Bahaya letusan yang lain adalah adanya *nuèè ardente* atau awan panas yang keluar ke arah atas membentuk bunga, kemudian mengalir sepanjang lereng dengan kecepatan tinggi. Fraksi-fraksi berat dalam *nuèè ardente* ini akan tersebar mengikuti

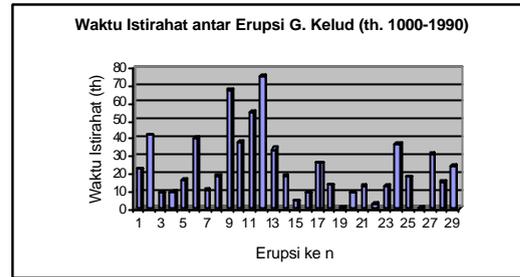
bentang alam, sedang fraksi ringan yang berupa gas, pasir, debu dan udara panas akan tersembur ke arah vertikal dan horizontal dengan jarak alirannya mencapai 8 km dari kawah.



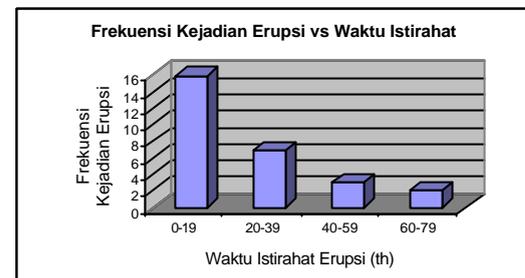
Gambar 2. Model bawah permukaan Gunungapi Kelud berdasarkan anomali gravitasi (Koesuma, 2001)

3. ANALISIS RUNTUN WAKTU ERUPSI G. KELUD

Sejarah mencatat kejadian erupsi G. Kelud mulai tahun 1000 hingga 1990 Masehi terdapat 31 kejadian erupsi, dengan waktu istirahat antar erupsi (*repose period*) yang bervariasi mulai dari 1 hingga 311 tahun. Variasi waktu istirahat erupsi ini pada umumnya proporsional dengan tingkat energi pada erupsi yang mengikutinya. Jika waktu istirahat antar erupsi pendek, maka biasanya energi pada erupsi yang mengikutinya juga kecil, sebaliknya apabila waktu istirahatnya panjang, maka energi dari erupsi yang mengikutinya juga besar. Gambar 3 adalah histogram yang menunjukkan runtun waktu dari waktu istirahat (*repose period*) G. Kelud mulai tahun 1000 hingga 1990, sedangkan Gambar 4 adalah histogram yang menggambarkan cacah kejadian erupsi sebagai fungsi waktu istirahat yang dikelompokkan dalam kurun waktu 20 tahunan.



Gambar 3. Histogram yang menggambarkan



Gambar 4. Histogram yang menggambarkan cacah kejadian erupsi sebagai fungsi waktu istirahat (*repose period*)

Secara statistik distribusi runtun waktu erupsi gunungapi dapat dinyatakan sebagai mempunyai distribusi eksponensial (Wickmann, 1965),

$$N(I, t) = N_o (e^{-It}) \dots\dots\dots (1)$$

dengan,

N = Cacah erupsi yang mempunyai waktu istirahat lebih lama dari pada t

N_o = Cacah erupsi yang mempunyai waktu istirahat lebih lama dari pada 0 tahun; nilainya untuk erupsi G. Kelud 31,536.

t = Waktu istirahat; nilainya untuk erupsi G. Kelud berkisar dari 1 tahun sampai dengan 311 tahun (Lampiran, Tabel 1)

I = Koefisien atenuasi eksponensial;

Nilai I untuk erupsi G. Kelud 0.0413/tahun (Gambar 5) dengan koefisien korelasi $R = 0,995$ dari $R^2 = 0,989$ untuk 9 data yang terkorelasi, berarti mempunyai *confidence level* mendekati 99% (Bevington, 1969).

Distribusi statistik eksponensial (1) mempunyai nilai menengah (T , *mean value*) $1/\lambda$, dalam hal runtun waktu erupsi gunungapi dapat disebut juga sebagai waktu istirahat erupsi rerata. T untuk G. Kelud dengan $\lambda = 0,0413$ /tahun menjadi sebesar 24,21 tahun. Ini tidak berarti bahwa setiap 24,21 tahun selalu terjadi erupsi, jadi salah apabila T ini dikatakan sebagai periode ulang. Gejala kejadian yang mempunyai distribusi statistik eksponensial Poissonian pada dasarnya adalah gejala yang bersifat acak (*random*).

Runtun waktu erupsi gunungapi mempunyai Fungsi Densitas Kebolehjadian (PDF, *Probability Density Function*, Wickmann, 1965) tidak terjadinya erupsi,

$$\text{PDF Tidak Erupsi } (I, t) = I t (e^{-\lambda t}) \dots\dots\dots(2)$$

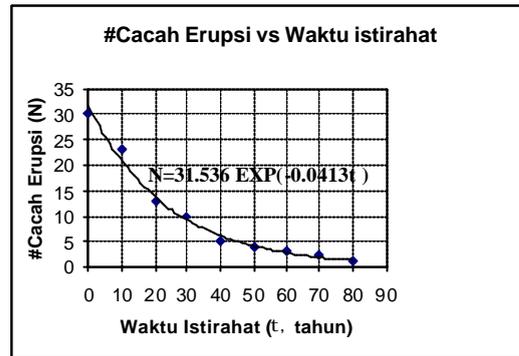
Fungsi PDF Tidak Erupsi (I, t) ini dapat dikategorikan sebagai fungsi distribusi statistik Poissonian. Fungsi PDF tidak terjadinya erupsi G. Kelud dengan $\lambda = 0,0413$ /tahun dapat dilihat pada Gambar 6, sehingga fungsi PDF terjadinya erupsi menjadi,

$$\text{PDF Erupsi } (I, t) = 1 - I t (e^{-\lambda t}) \dots\dots\dots(3)$$

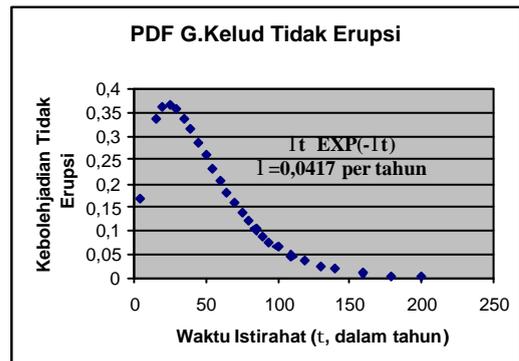
Gambar 7 melukiskan Fungsi PDF terjadinya erupsi G. Kelud dengan $\lambda = 0,0413$ /tahun. Erupsi terakhir G. Kelud terjadi pada tanggal 10 Februari 1990 dengan *Volcano Explosivity Index* (VEI) = 4 (Jones dkk, 2000) dan menghamburkan sekitar 120 juta meter kubik material letusan. Dengan demikian pada saat ini G. Kelud mempunyai $t = 2007-1990 = 17$ tahun sehingga punya kebolehjadian erupsi sebesar $1 - 0,0413 \cdot 17 \cdot \text{EXP}(-0,0413 \cdot 17) = 10,347921 = 0,652079$ atau 65,2 %. Makin lama waktu istirahat, kebolehjadian terjadinya letusan semakin besar.

Sebagai perbandingan, Gunungapi Merapi yang mempunyai $\lambda = 0,03$ /bulan = 0,42/tahun dengan aras keyakinan 95%. Ini berarti Gunungapi Merapi mempunyai $T = 33$ bulan = 2,38 tahun (Kirbani, 1990), sehingga pada saat ini dengan waktu istirahat $t = 2007-2006 = 1$ tahun

mempunyai kebolehjadian terjadi letusan sebesar $1 - 0,42 \cdot 1 \cdot \text{EXP}(-0,42 \cdot 1) = 1 - 0,27595 = 0,72405$ atau 72,4%. Berdasarkan angka kebolehjadian terjadinya erupsi G. Kelud saat ini adalah 65,2%, maka saat ini ada nilai risiko yang harus ditanggung (*value at risk*) yang tidak dapat diabaikan kemungkinan terjadinya, sehingga tidak ada jalan lain kecuali harus ada tindakan mitigasi yang meminimalkan dampak negatif akibat erupsi G. Kelud ini.

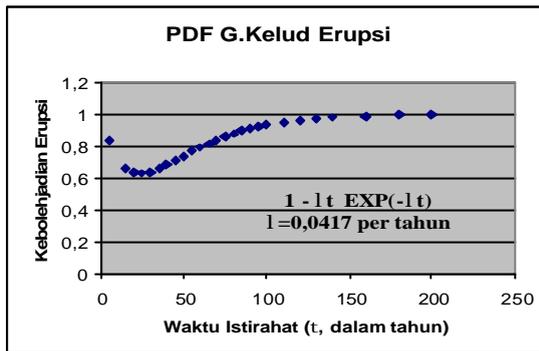


Gambar 5 Distribusi eksponensial (Wickmann, 1965) erupsi G. Kelud dari tahun 1000 sampai dengan tahun 1990. Tampilan Cacah Kejadian Erupsi yang mempunyai waktu istirahat lebih lama daripada sebagai fungsi Waktu Istirahat (*repose time t*, dalam tahun)



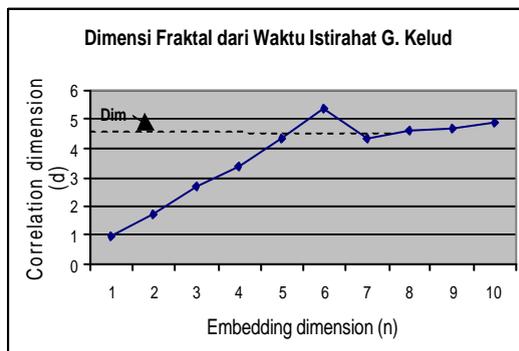
Gambar 6. Distribusi PDF tidak terjadinya erupsi G. Kelud yang mengikuti distribusi statistik Poissonian (Wickmann, 1965) Tampilan keboleh-jadian tidak terjadi nya erupsi pada saat G. Kelud mempunyai waktu istirahat t tahun

Gambar 8 adalah kurva yang menunjukkan nilai dimensi fraktal runtun waktu dari waktu istirahat G. Kelud mulai dari kejadian erupsi tahun 1000 hingga 1990. Dari kurva tersebut dapat dilihat nilai *correlation dimension* (d) akan jenuh pada nilai 4,5 dengan nilai *embedding dimension* $n = 7$.



Gambar 7. Distribusi PDF terjadinya erupsi G. Kelud yang mengikuti distribusi statistik Poissonian (Wickmann, 1965) Tampilan kebolehjadian terjadinya erupsi pada saat G. Kelud mempunyai waktu istirahat t tahun

Berdasarkan analisis fraktal, runtun waktu dari waktu istirahat G. Kelud mempunyai dimensi fraktal relatif rendah, yaitu 4,5. Hal ini dapat diinterpretasikan bahwa waktu terjadinya erupsi G. Kelud berlangsung secara random dan tidak ada suatu sistem yang mengontrolnya (Wahyudi, 1999).



Gambar 8. Kurva yang menggambarkan dimensi fraktal (tanda panah) dari waktu istirahat G. Kelud, dari tahun 1000 s/d 1990

4. ANALISIS RUNTUN WAKTU GEMPA BUMI DI SEKITAR G. KELUD

Di dalam ilmu seismologi hubungan antara cacah gempabumi sebagai fungsi magnitudo dinyatakan sebagai rumus Hukum Gutenberg dan Richter (Gutenberg and Richter, 1954):

$$\text{Log } N = A - bM \dots\dots\dots(3)$$

atau

$$N = 10^{A - bM} \dots\dots\dots(4)$$

dengan,

- N = cacah gempabumi pada kurun waktu tertentu yang mempunyai magnitudo M .
- M = magnitudo gempabumi
- A = tetapan
- b = tetapan yang disebut juga sebagai nilai- b atau b -value.

Nilai- b atau b -value gempabumi di berbagai tempat dan dalam kurun waktu tertentu pada umumnya bernilai sekitar 1. Sebaran gempabumi yang terjadi di sekitar gunungapi Kelud terlihat pada Gambar 9, mempunyai kerapatan ke arah selatan semakin rapat, sedangkan dalam arah barat dan timur menunjukkan kerapatan yang merata. Gejala ini dapat diterangkan bahwa proses penyusupan lempeng tektonik Australia terhadap lempeng tektonik Eurasia di bawah pulau Jawa mengarah ke utara dan tegak lurus pantai. Berdasarkan gejala tersebut, perhitungan nilai- b untuk gempabumi di sekitar gunungapi Kelud ($7,9^\circ$ Lintang Selatan; $112,8^\circ$ Bujur Timur, PVMBG, 2007), dapat digunakan data gempabumi yang terjadi antara garis bujur $111,8^\circ$ Bujur Timur dan $112,8^\circ$ Bujur Timur serta garis lintang 3° Lintang Selatan dan 17° Lintang Selatan.

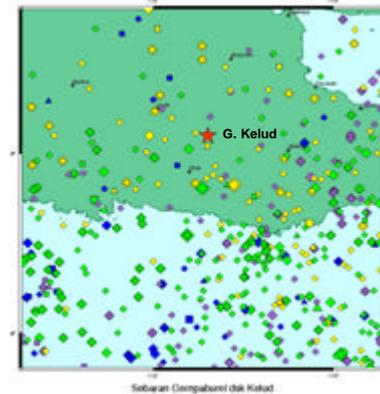
Perhitungan nilai- b gempabumi di sekitar gunungapi Kelud tahun 1973-2007 (USGS, 2007) yang terjadi antara garis bujur $111,8^\circ$ Bujur Timur dan $112,8^\circ$ Bujur Timur serta garis lintang 3° Lintang Selatan dan 17° Lintang Selatan, menunjukkan bahwa nilai- b (b -value) = 1,0032 (Gambar 10) dengan

koefisien korelasi $R = 0,977$ dari $R^2 = 0,955$. Nilai- b untuk gempabumi yang terjadi sebelum erupsi pada tanggal 10 Februari 1990 juga dihitung dengan cara yang sama dan hasilnya nilai- b sebelum erupsi 1990 = 0,8817 dengan $R^2 = 0,957$ atau $R = 0,978$. Nilai- b sesudah erupsi (1990-2007) = 1,0147 dengan $R^2 = 0,959$ atau $R = 0,979$. Smith (1981) mengindikasikan adanya penurunan nilai- b menjelang terjadinya gempabumi besar (*foreshocks*) dan kenaikan nilai- b setelah terjadinya sebuah gempabumi besar tersebut (*aftershocks*). Menurut Rao dan Prasanna Lakshmi (2005) dalam percobaan di laboratorium, turunnya nilai- b ini juga terjadi pada batuan yang akan mengalami retakan (*cracking*) setelah mengalami tegangan kompresi semakin meningkat besarnya secara relatif terhadap tegangan kritis (*critical failure stress*).

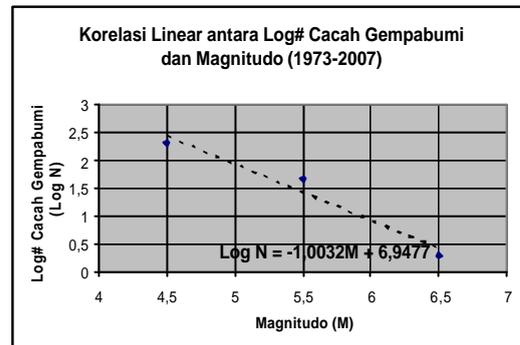
Nilai- b yang tinggi secara statistik berarti adanya gejala gempabumi dengan magnitudo kecil yang meningkat cacahnya, sedangkan nilai- b yang rendah menunjukkan gejala gempabumi dengan magnitudo semakin besar yang meningkat cacahnya. Kenaikan nilai- b merepresentasikan adanya retakan baru (*new cracks*) dan lambatnya tingkat pertumbuhan retakan itu (*slow crack growth*), gejala ini terjadi pada pasca terjadinya gempabumi yang besar (*after-shocks*). Sebaliknya penurunan nilai- b mengindikasikan adanya peningkatan kelajuan retakan atau ketidakstabilan pertumbuhan retakan (Rao dan Prasanna Lakshmi, 2005).

Nilai- b runtun waktu gempabumi di sekitar G. Kelud menjelang erupsi 1973-1990 (0,8817) yang lebih rendah dari nilai- b runtun waktu 1973 - 2007 (1,0032) menunjukkan bahwa sebenarnya ada indikasi anomali nilai- b yang rendah atau lebih kecil daripada 1 menjelang terjadinya erupsi 1990. Setelah terjadi erupsi 1990, runtun waktu gempabumi 1990-2007 nilai- b nya menjadi 1,0147 yang lebih tinggi atau lebih besar dari pada 1. Rendahnya nilai- b menjelang erupsi G. Kelud 1990 dapat diterangkan dengan adanya gejala penimbunan tegangan (*stress accumulation*)

yang disertai dng gejala adanya peningkatan kelajuan retakan atau ketidakstabilan pertumbuhan retakan-retakan baru yang diakhiri dengan erupsi (*catastrophic failure*).



Gambar 9 Sebaran gempabumi yang terjadi di sekitar G. Kelud. Makin besar ukuran kotak makin besar magnitudonya, makin gelap warna kotak makin dalam hiposenternya



Gambar 10. Korelasi Linear antara Log# Cacah Gempabumi ($\log N$) dan Magnitudo (M) dari data gempabumi disekitar Gunungapi Kelud tahun 1973-2007 (USGS, 2007) yang terjadi antara garis bujur 111,8° Bujur Timur dan 112,8° Bujur Timur serta garis lintang 3° Lintang Selatan dan 17° Lintang Selatan, menunjukkan bahwa nilai- b (b -value) = 1,0032

Kenaikan nilai- b setelah terjadinya erupsi G. Kelud 1990 dengan V.E.I. 4 (Jones dkk, 2000) yang kira-kira setara dengan magnitudo gempabumi 6 skala Richter, ini juga dapat dimengerti, karena erupsi gunungapi juga

merupakan gejala pelepasan tegangan yang luar biasa (*significantly big stress release/ drop*) yang wajar apabila diikuti dengan lambatnya tingkat pertumbuhan retakan.

5. KESIMPULAN

- Runtun waktu erupsi G. Kelud 1000–1990 mempunyai karakteristik stokastik acak, dengan cacah erupsi sebagai fungsi waktu istirahat mempunyai distribusi statistik eksponensial dan fungsi PDF Poissonian.
- Koefisien atenuasi cacah erupsi fungsi waktu istirahat G. Kelud sama dengan 0,0417 per tahun atau nilai menengah waktu istirahat 24,21 tahun.
- Erupsi G. Kelud pada tanggal 10 Februari 1990 menghamburkan material erupsi 120 juta meter kubik sesuai dengan V.E.I. 4 yang setara dengan magnitudo gempabumi 6 skala Richter.
- Pada tahun 2007 G. Kelud mempunyai kebolehjadian akan mengalami erupsi sebesar 65,2%.
- Runtun waktu gempabumi 1973-1990 di sekitar G. Kelud atau sebelum sampai terjadinya erupsi 1990 mempunyai nilai $i-b < 1$ (lebih kecil daripada 1) dapat dimaknai dengan adanya proses penimbunan tegangan yang diikuti dengan bertambah cepatnya pertumbuhan retakan dan diakhiri dengan pelepasan tegangan total pada saat terjadinya erupsi 1990.
- Runtun waktu gempabumi 1990-2007 di sekitar G. Kelud atau setelah terjadinya erupsi 1990 sampai 2007 mempunyai nilai $i-b > 1$ (lebih besar daripada 1) dapat dimengerti sebagai melambatnya pertumbuhan retakan pada saat dimulainya babak baru penimbunan tegangan.
- Nilai- b gempabumi yang terjadi di sekitar G. Kelud mempunyai kemungkinan dapat dipakai sebagai besaran fisis yang harus dipantau dalam rangka mengantisipasi terjadinya erupsi di masa yang akan datang.

- Berdasarkan analisis fraktal, runtun waktu dari waktu istirahat G. Kelud mempunyai dimensi fraktal relatif rendah, yaitu 4,5. Hal ini dapat diinterpretasikan bahwa waktu terjadinya erupsi G. Kelud berlangsung secara random dan tidak ada suatu sistem yang mengontrolnya

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih atas dukungan Program Studi dan Laboratorium Geofisika, Jurusan Fisika, FMIPA- Universitas Gadjah Mada dalam aktivitas kajian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Bevington, P.R., 1969, *Data reduction and error analysis for the physical sciences*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Gutenberg, B., and Richter, C. F., 1954, *Seismicity of the Earth*: Princeton, Princeton University Press, 440p.
- Jones, A., Siebert, L., Kimberly, P., and Luhr, J.F., 2000, *Earthquakes and eruptions, Temporal and spatial display of earthquake hypocenters, seismic wave paths, and volcanic eruptions*, v. 1.0 (CD-ROM), Smithsonian Institute, Global Volcanism Program, Digital Information Series, GVP-2.
- Kirbani, S.B., 1990, Analysis of Volcanic Tremor at Mount Merapi (Central Java, Indonesia) in order to Understand Internal Magma Flow, *Disertasi Doktor* Universitas Gadjah Mada 1990.
- Koesuma, S., 2001. Analisis Struktur Bawah Permukaan Gunung Kelud Menggunakan Metode Gravitasi. *Thesis S2* Program Pasca Sarjana, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- PVMBG, 2007, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Sejarah Letusan Gunungapi Kelud, <http://portal.vsi.esdm.go.id/joomla/> dan <http://www.desdm.go.id/>

- Rao, M. V. M. S., and K. J. Prasanna Lakshmi, 2005, Analysis of *b*-value and improved *b*-value of acoustic emissions accompanying rock fracture, *Current Science*, Vol. 89, No. 9, 10 November 2005 1582
- Smith, W. D., The *b*-value as an earthquake precursor. *Nature*, 1981, 289, 136–139.
- USGS, 2007, NEIC - USGS Earthquakes search result, *USGS National Earthquake Information Center*, <http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic.html>
- Wickmann, F.E., 1965, *Repose Period Pattern of Volcanoes II*. Eruption Histories of some Indian Volcanoes, *Arkiv Foer Mineralogi Och Geologi*, Band 4 Nr 6, Uppsala.
- Wahyudi, 1999. A Study of the Eruption Mechanism of Krakatau Volcano Based on Seismic Data of the 1992-1997 Activities. *Doctor Thesis*, Gadjah Mada University, Yogyakarta.

LAMPIRAN

Tabel 1. Daftar Erupsi G. Kelud dari tahun 1000 sampai dengan tahun 1990 (PVMBG, 2007) yang dimodifikasi

Nomer	Tahun Erupsi	Keterangan	Waktu Istirahat (? dalam tahun)
1.	1000	Erupsi sentral	311
2.	1311	Tidak ada rincian; ada korban jiwa	23
3.	1334	Tidak ada rincian; ada korban jiwa	42
4.	1376	Erupsi sentral, pembentukan kubah lava, bukan erupsi efusif, tidak ada aliran piroklastik; ada korban jiwa	9
5.	1385	Tidak ada rincian	10
6.	1395	Tidak ada rincian	16
7.	1411	Tidak ada rincian	40
8.	1451	Tidak ada rincian	11
9.	1462	Tidak ada rincian	19
10.	1481	Tidak ada rincian	67
11.	1548	Tidak ada rincian	38
12.	1586	Tidak ada rincian; 10000 korban jiwa	55

13.	1541	Tidak ada rincian	75
14.	1716, 28 Juli	Tidak ada rincian: ada korban jiwa	36
15.	1752, 1 Mei	Erupsi sentral:	19
16.	1771,10 Januari	Erupsi sentral:	5
17.	1776	Tidak ada rincian	9
18.	1785, 5 Juni	Tidak ada rincian	26
19.	1811	Tidak ada rincian	14
20.	1825	Tidak ada rincian, ada korban jiwa	1
21.	1826,11-25 Okt	Tidak ada rincian	9
22.	1835	Tidak ada rincian	13
23.	1848, 16 Mei	Kawah terbuka kea rah Barat Daya. Ada korban jiwa	3
24.	1851, 24 Jan	Tidak ada rincian	13
25.	1864, 3-4 Jan	Tidak ada rincian	37
26.	1901,22-23 Mei	Erupsi Sentral Ekxplosif; 22juta meter kubik material letusan	18
27.	1919, Desember	Erupsi Sentral Ekxplosif; Aliran piroklastik, 5160 korban jiwa	1
28.	1920, 21 Des	Terbentuk sumbat lava di kawah di bawah permukaan air danau	31
29.	1951, 31 Agustus	Erupsi Sentral Ekxplosif; dasar kawah naik 43 m, 200 juta meter kubik material letusan, 7 korban jiwa	15
30.	1966	Erupsi Sentral Ekxplosif; 90 meter kubik material letusan, 210 korban jiwa	24
31.	1990	Erupsi Sentral Ekxplosif; 120 meter kubik material letusan	