e-ISSN 2580 - 0752

BULLETIN OF
GEOLOGY
Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian (FITB)
Institut Teknologi Bandung (ITB)

ANALISIS PROBABILITAS ERUPSI GUNUNG ANAK KRAKATAU, PROVINSI LAMPUNG PERIODE 1927-2019 BERDASARKAN METODE POHON KEJADIAN

MUHAMMAD RAHALDI TAHER[1], DEVITO PRADIPTA[1], FIRDAUS EL AFGHANI[1], DWI JULIANTI[2]

[1]Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian,
[2]Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung (ITB), Jl. Ganesha No.10, Bandung, Jawa Barat, Indonesia, Email: mrahalditaher@gmail.com

Sari – Analisis probabilitas berupa pohon kejadian pada data erupsi gunung api merupakan salah satu metode yang mampu memprediksi aspek bencana gunung api. Gunung Anak Krakatau merupakan salah satu gunung api aktif pada Busur Sunda yang memiliki rekam jejak erupsi dengan indeks eksplosivitas yang bervariasi dari dua hingga enam. Kami melakukan analisis untuk memprediksi peluang aspek bencana gunung api yang dapat terjadi di masa yang akan datang dengan menggunakan teorema Bayes. Data aspek kebencanaan Gunung Anak Krakatau pada tahun 1927 - 2019 dihimpun dalam sebuah pohon kejadian untuk dilakukan perhitungan probabilitas. Aspek kebencanaan gunung api yang menjadi parameter dalam prediksi probabilitas antara lain keaktifan gunung api, genesis erupsi, magnitudo, tipe erupsi, dan tingkat kerentanan. Prediksi probabilitas pada aspek kebencanaan tersebut dihitung berdasarkan teorema Bayes dan kemudian disusun pada pohon kejadian untuk menganalisis aspek kebencanaan gunung api. Penyusunan pohon kejadian pada aspek kebencanaan menunjukkan bahwa tipe erupsi vulkanian dengan nilai indeks eksplosivitas sebesar dua pada Gunung Anak Krakatau memiliki probabilitas yang paling tinggi untuk terjadi pada waktu yang akan datang. Penyusunan grafik seri periode istirahat Gunung Anak Krakatau menunjukkan bahwa sebagian erupsi terjadi secara independen dan sebagian terjadi dalam serangkaian proses erupsi.

Kata kunci: Gunung Anak Krakatau, pohon kejadian, probabilitas erupsi

Abstract - *The probability analyses of event tree on volcanic eruption data is one of the useful method to predict the volcanic hazard aspects. Anak Krakatau is one of the active volcano in the Sunda Arc which recorded historical eruption with variously ranged Volcanic Explosivity Index from two to six. We conducted some analyses through Bayes theorem in order to predict the probability of the volcanic hazard aspects which are possible to occur in future. The volcanic hazard aspects data of Anak Krakatau Volcano is grouped into an event tree for their probability calculations. The volcanic hazard aspects that become the parameters within the probability prediction are consisted of volcano activity, eruption genesis, magnitude, eruption type, and vulnerability level. The probability prediction on the volcanic hazard aspects is calculated by using Bayes theorem and arranged into an event tree to analyze the volcanic hazard aspects. The arranged event tree in the volcanic hazard aspects shows that vulcanian eruption type with Volcanic Explosivity Index of two has the highest probability to occur on Anak Krakatau Volcano in future. Repose time series graph of Anak Krakatau Volcano shows that some eruptions are independently occured and some eruptions are also occurred as a sequence of eruption process.*

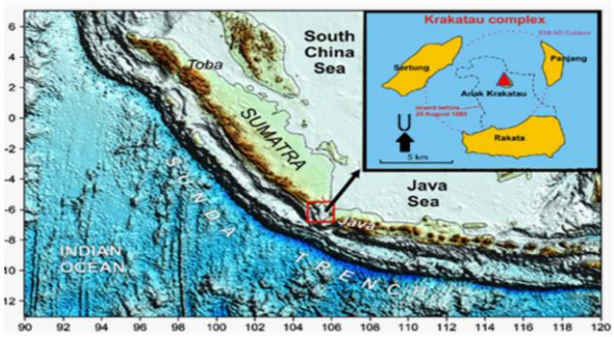
Keywords*: Anak Krakatau Volcano, event tree, eruption probability*

1. PENDAHULUAN

Erupsi gunung api di Indonesia dalam beberapa waktu yang lalu sempat sering terjadi dan menghebohkan masyarakat. Salah satu tantangan dalam penentuan potensi erupsi gunung api adalah waktu terjadinya erupsi. Selain itu, sifat erupsi yang kompleks dan bervariasi menjadi tantangan dalam penentuan skema mitigasi bencana erupsi gunung api. Pada banyak kasus erupsi gunung api, disusun sebuah alur skenario erupsi yang dikenal sebagai pohon kejadian. Metode ini sangat berguna terutama pada gunung api yang memiliki catatan sejarah erupsi dan data geologi yang lengkap (Newhall dan Hoblitt, 2002) seperti Gunung Anak Krakatau.

Gunung Anak Krakatau tergolong sebagai gunung api Tipe A yang terus mengalami erupsi sejak kemunculannya pada tahun 1927.

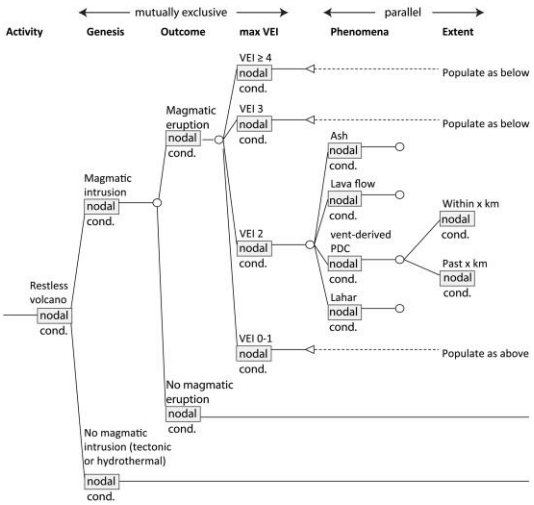
Gunung Anak Krakatau merupakan bagian dari jalur gunung api Busur Sunda yang terletak di Selat Sunda **(Gambar 1)** dan terbentuk akibat tumbukan Lempeng Eurasia dan Indo-Australia serta proses robekan yang terjadi akibat perbedaan arah subduksi antara Pulau Sumatera dan Pulau Jawa (Nishimura dkk., 1992; Siebert dkk., 2011). Gunung api ini merupakan bagian dari Kompleks Gunung Anak Krakatau yang terdiri atas Gunung Anak Krakatau, Rakata, Panjang, dan Sertung. Pulau Panjang, Pulau Sertung, dan Pulau Rakata diperkirakan sebagai sisa dari tubuh Krakatau Purba (Jaxybulatov dkk., 2011) serta Pulau Rakata juga merupakan sisa gunung api Rakata yang sebagian tubuhnya hancur saat erupsi tahun 1883 (Abdurrachman dkk., 2018) dengan Anak Krakatau yang tumbuh di lereng bagian timur laut dari kaldera erupsi 1883 (Giachetti dkk., 2012).



Gambar 1. Lokasi Gunung Anak Krakatau (Jaxybulatov dkk., 2011).

Penelitian mengenai aktivitas vulkanik Gunung Anak Krakatau sudah banyak dilakukan oleh peneliti-peneliti lain baik dari dalam maupun luar negeri (Zen dan Hadikusumo, 1964; Zen, 1969; Mandeville dkk., 1996; Sutawidjaja, 1997; Dahren dkk., 2012; Abdurrachman dkk., 2018). Namun, pemahaman secara kuantitatif terhadap kemungkinan erupsi di masa yang akan datang belum pernah dilakukan. Penulis melakukan penelitian ini untuk menghitung probabilitas erupsi Anak Krakatau untuk menentukan potensi erupsinya di masa depan.

Penelitian kuantitatif ini dilakukan dengan menggunakan metode pohon kejadian yang tersusun atas parameter kebencanaan Gunung Anak Krakatau. Pohon kejadian menggambarkan kerangka fenomena yang dapat terjadi dalam sebuah erupsi gunung api. Setiap kerangka yang menyusun pohon kejadian tersebut mengandung parameter-parameter dengan nilai probabilitas yang dihitung secara *conditional* maupun *nodal* **(Gambar 2)**. Penggunaan pohon kejadian dalam memprediksi letusan gunung api telah menunjukkan hasil yang positif pada St. Helens, Pinatubo, Montserrat, Popocatepetl, Guagua Pichincha, Tungurahua, dan Sinabung (Newhall, 1982; Newhall, 1984; Punongbayan dkk. 1996 dalam Newhall dan Punongbayan, 1996; Aspinall dan Cooke, 1998; Newhall dan Hoblitt, 2002; Wright dkk., 2018).



Gambar 2. Model umum pohon kejadian untuk prediksi skenario erupsi gunung api berdasarkan aspek kebencanaan pada perhitungan probabilitas (Wright dkk., 2018).

2. DATA DAN METODOLOGI

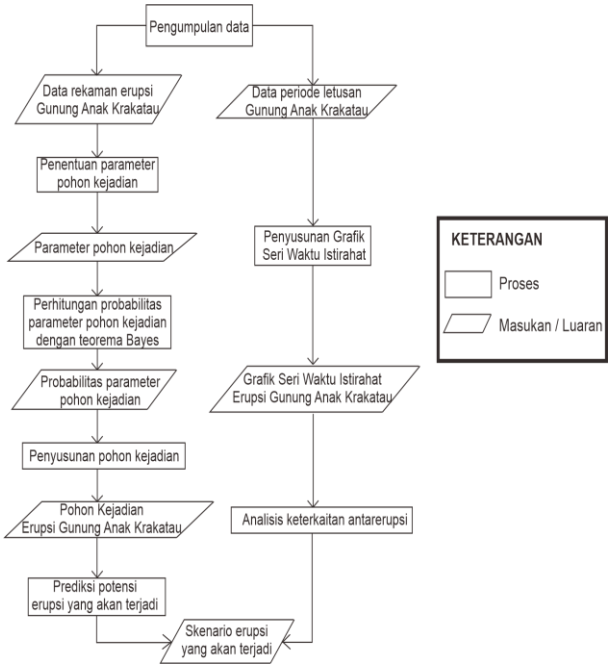
2.1 Data

Analisis probabilitas erupsi Gunung Anak Krakatau dilakukan berdasarkan data yang dihimpun dari literatur yang berasal dari *Global Volcanism Program,* penelitian tentang Gunung Anak Krakatau, dan laporan penelitian yang berkaitan dengan perkembangan Gunung Anak Krakatau yang dirilis oleh Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia **(Tabel 1)**. Data berupa tipe erupsi dan nilai magnitudo berupa *Volcanic Explosivity Index* (VEI) yang berjumlah 56 rekaman dengan rentang waktu dari 1927 hingga 2019. Data tipe erupsi yang terhimpun telah ditinjau karakteristiknya untuk menjabarkan keaktifan gunung api dan genesis erupsi serta dibandingkan dengan interpretasi genesis tipe erupsi serupa di dunia berdasarkan Wright dan Cas (1988) dan Pyle (2015) dalam Sigurdsson dkk. (2015).

Data erupsi Gunung Anak Krakatau menunjukkan bahwa tipe erupsi strombolian, vulkanian, surtseyan, dan freatik pernah terjadi dari tahun 1927 hingga 2019. Variasi VEI yang diperoleh pada data menunjukkan rentang indeks satu hingga tiga. Tipe erupsi strombolian memiliki frekuensi terbanyak, yakni 24 rekaman. Indeks eksplosivitas erupsi dengan nilai VEI dua paling sering terjadi dengan jumlah 40 rekaman. Tipe erupsi campuran seperti vulkanian-freatik, strombolian-freatik, strombolian-vulkanian, dan vulkanian-surtseyan juga terekam pada data erupsi Gunung Anak Krakatau.

2.2 Metode Penelitian

Penelitian ini diawali dengan pengumpulan data rekaman erupsi dan data periode letusan Gunung Anak Krakatau. Data rekaman erupsi digunakan untuk memprediksi skenario erupsi Gunung Anak Krakatau yang dapat terjadi di masa depan dan data periode letusan Gunung Anak Krakatau digunakan untuk menyusun grafik seri waktu istirahat. Penyusunan grafik seri waktu istirahat diperlukan untuk membantu dalam pemilihan skenario erupsi Anak Krakatau. Prediksi skenario erupsi Gunung Anak Krakatau dilakukan dengan pengumpulan parameter dari data rekaman erupsi, perhitungan probabilitas, dan penyusunan pohon kejadian. Tahapan penelitian disusun pada sebuah diagram alir **(Gambar 3).**



Gambar 3. Diagram alir penelitian.

2.2.1 Pohon Kejadian

Metode ini dilakukan dengan menghimpun aspek kebencanaan dari data erupsi Gunung Anak Krakatau berupa keaktifan gunung api, genesis, tipe erupsi, dan magnitudo dalam perhitungan probabilitas yang dilakukan dengan menggunakan Teorema Bayes.

Teorema Bayes merupakan metode perhitungan yang memperhitungkan kondisi tertentu yang sebelumnya telah terjadi dalam probabilitas peristiwa yang diprediksi untuk terjadi. Probabilitas tersebut dinyatakan dalam bentuk P(n).

$$P(n) = P(1) \cdot P(2|1) \cdot P(3|2) \ldots \cdot (Pn|n-1)(1)$$

Keterangan:

P(n) = probabilitas kejadian ke-n untuk terjadi

Perhitungan nilai P(n|n-1) dengan Teorema Bayes dinyatakan dalam rumus sebagai berikut.

$$P(n|n-1) = \frac{P(n-1|n) \cdot P(n)}{P(n-1|n) \cdot P(n) + P(n-1|n') \cdot P(n')} \quad (2)$$

Keterangan:

P(n|n-1) = probabilitas kejadian ke-n untuk terjadi ketika kejadian ke-(n-1) telah terjadi

Nilai probabilitas yang diperoleh dihimpun dalam sebuah pohon kejadian yang digunakan untuk memprediksi tipe letusan dan VEI yang paling memungkinkan terjadi. Penyusunan pohon kejadian berdasarkan nilai probabilitas dari Teorema Bayes disusun berdasarkan notasi-notasi berikut:

P(1): Probabilitas gunung api selalu erupsi (keaktifan gunung api).

P(2|1): Probabilitas erupsi yang disebabkan oleh suatu proses (genesis).

P(3|2): Probabilitas bahwa erupsi terjadi pada salah satu tipe erupsi (tipe erupsi).

P(4|3): Probabilitas bahwa erupsi terjadi dengan VEI tertentu pada salah satu tipe erupsi (magnitudo).

Prediksi erupsi Gunung Anak Krakatau di masa depan ditentukan berdasarkan nilai probabilitas terbesar pada pohon kejadian dan dibandingkan dengan tren data rekaman erupsi dan seri waktu istirahat Gunung Anak Krakatau.

2.2.2 Seri Waktu Istirahat

Sebagian besar kejadian erupsi gunung api merupakan fenomena acak tetapi, pada beberapa kasus menunjukkan suatu pola tertentu yang berkaitan dengan aktivitas gunung api tersebut (Varley dkk., 2006). Salah satunya adalah seri waktu istirahat pada suatu gunung api (Wickman, 1976). Seri waktu istirahat adalah seri waktu antara dua kejadian erupsi pada suatu gunung api yang dapat menggambarkan proses pengisian kembali magma ke dalam dapur magma (Annen dkk., 2006) dan kaitan antara dua kejadian erupsi dalam kerangka waktu (Wickman, 1976). Analisis seri waktu istirahat Gunung Anak Krakatau dilakukan dengan mengelompokkan nilai VEI yang sama pada masing-masing data erupsi dan nilai VEI secara keseluruhan dari seluruh data erupsi. Kemudian, pada masing-masing kelompok dilakukan pengeplotan nilai waktu istirahat antar erupsi (T(i)) sebagai sumbu-X dan nilai waktu istirahat antar erupsi berikutnya (T(i+1)) sebagai sumbu-Y dalam suatu grafik bivariat menggunakan *Microsoft Excel*.

3. HASIL DAN ANALISIS

3.1 Pohon Kejadian

Berdasarkan parameter yang terdapat pada data rekaman erupsi Gunung Anak Krakatau, pohon kejadian yang digunakan untuk memprediksi erupsi Gunung Anak Krakatau di masa depan disusun menjadi empat sektor. Keempat sektor tersebut antara lain keaktifan gunung api, genesis, tipe erupsi, dan magnitudo. Sektor pertama ditempatkan pada parameter keaktifan gunung api yang dihitung sebagai nilai probabilitas P(1). Sektor kedua, ketiga, dan keempat secara berurutan ditempatkan pada parameter genesis, tipe erupsi, dan magnitudo serta dihitung sebagai nilai probabilitas P(2|1), P(3|2), dan P(4|3) **(Gambar 4)**. Parameter keaktifan gunung api (P(1)) pada sektor pertama pohon kejadian menyatakan keadaan aktif dapur magma Gunung Anak Krakatau yang menimbulkan aktivitas vulkanisme. Data rekaman erupsi Gunung Anak Krakatau secara keseluruhan menunjukkan adanya aktivitas vulkanisme berupa erupsi yang berkaitan dengan keaktifan dapur magma Gunung Anak Krakatau.

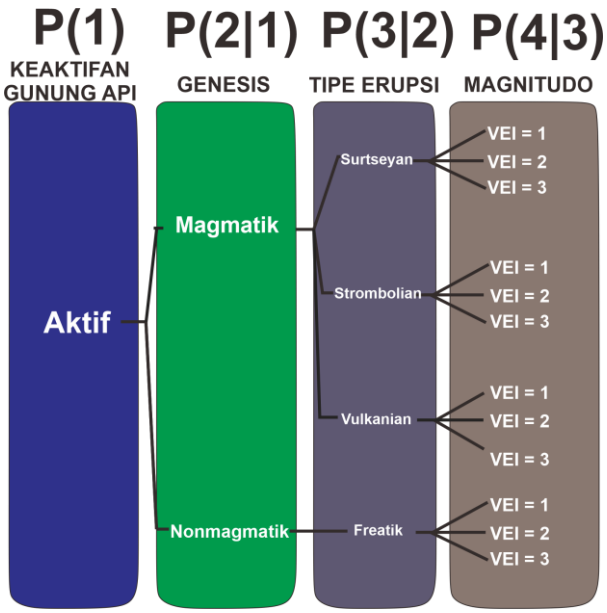
Probabilitas P(1) menunjukkan nilai 100 % yang menunjukkan bahwa erupsi yang terjadi disebabkan karena Gunung Anak Krakatau sedang dalam keadaan aktif. Setiap gejala aktivitas Gunung Anak Krakatau yang terekam pada data rekaman 1927 - 2019 menunjukkan kondisi dapur magma yang sedang aktif.

Parameter genesis erupsi Gunung Anak Krakatau (P(2|1)) pada sektor kedua pohon kejadian menyatakan proses yang menimbulkan erupsi.

Tabel 1. Rekaman data erupsi Gunung Anak Krakatau (Keterangan, *GVPD*: *Global Volcanism Program Database*, PVMBG: Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi).

Tahun	Tipe erupsi	VEI	Referensi
1927	vulkanian dan freatik	2	*GVPD*; Rasjid (1990); Gunawan (2008)
1928	vulkanian	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1929	vulkanian	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1930	vulkanian	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1931	freatik	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1932	freatik	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1933	vulkanian	3	*GVPD*; Rasjid (1990)
1934	vulkanian	3	*GVPD*; Rasjid (1990)
1935	vulkanian dan freatik	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1936	vulkanian dan freatik	1	*GVPD*; Rasjid (1990)
1937	vulkanian dan freatik	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1938	vulkanian dan freatik	3	*GVPD*; Rasjid (1990) ; Gunawan (2008)
1939	vulkanian dan freatik	3	*GVPD*; Rasjid (1990)
1940	vulkanian dan freatik	3	*GVPD*; Rasjid (1990) ; Gunawan (2008)
1941	vulkanian dan freatik	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1942	vulkanian dan freatik	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1943	vulkanian	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1944	vulkanian	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1945	vulkanian	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1946	vulkanian	1	*GVPD*; Rasjid (1990)
1947	vulkanian	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1948	vulkanian	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1949	vulkanian	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1950	vulkanian	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1952	vulkanian	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1953	vulkanian	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1954-1958	vulkanian	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1959	vulkanian	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1960	vulkanian	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1961	strombolian	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1963	strombolian	2	*GVPD*; Rasjid (1990)
1964-1968	strombolian dan freatik	1	Rasjid (1990); Gunawan (2008)
1972	strombolian	2	*GVPD*; Rasjid (1990); Abdurrachman dkk (2018)
1973	strombolian	2	*GVPD*; Abdurrachman dkk (2018)
1975	strombolian	2	*GVPD*; Rasjid (1990); Abdurrachman dkk (2018)
1978-1979	strombolian	2	*GVPD*; Rasjid (1990); Abdurrachman dkk (2018)
1980-1981	strombolian	1	*GVPD*; Rasjid (1990); Abdurrachman dkk (2018)
1988	strombolian	2	*GVPD*; Rasjid (1990); Abdurrachman dkk (2018)
1992	strombolian	1	*GVPD*; Sutawidjaja (1997)
1993	strombolian	1	*GVPD*; Sutawidjaja (1997)
1994	strombolian	2	*GVPD*; Sutawidjaja (1997)
1995	strombolian	2	*GVPD*; Sutawidjaja (1997)
1996	strombolian	2	*GVPD*; Sutawidjaja (1997)
1997	strombolian	2	*GVPD*; Abdurrachman dkk (2018)
1998	strombolian	2	PVMBG (2014); Abdurrachman dkk (2018)
1999	strombolian	2	*GVPD*; PVMBG (2014); Abdurrachman dkk (2018)
2000	strombolian	2	*GVPD*; PVMBG (2014); Abdurrachman dkk (2018)
2001	strombolian	1	*GVPD*; Gunawan (2008)
2007	strombolian dan vulkanian	2	*GVPD*; Gunawan (2008)
2008	strombolian dan vulkanian	2	*GVPD*; Gunawan (2008)
2010	strombolian dan vulkanian	2	*GVPD*; Abdurrachman dkk (2018)
2011	strombolian dan vulkanian	2	*GVPD*
2014	strombolian dan vulkanian	1	*GVPD*; Abdurrachman dkk (2018)
2017	strombolian	1	*GVPD*; Abdurrachman dkk (2018)
2018	strombolian dan vulkanian	3	*GVPD*
2019	vulkanian dan surtseyan	3	*GVPD*

Tipe erupsi strombolian, vulkanian, dan surtseyan menghasilkan material juvenil sehingga dikelompokkan pada cabang erupsi magmatik pada sektor genesis erupsi. Tipe erupsi freatik yang timbul karena proses pemanasan air di bawah permukaan oleh magma dan tidak menghasilkan material juvenil dikelompokkan pada cabang erupsi non-magmatik pada sektor genesis erupsi..



Gambar 4. Pohon kejadian Gunung Anak Krakatau berdasarkan data rekaman erupsi tahun 1927-2019.

Berikut merupakan salah satu contoh penghitungan probabilitas terjadinya erupsi yang ditimbulkan oleh aktivitas magmatik pada dapur magma berdasarkan teorema Bayes.

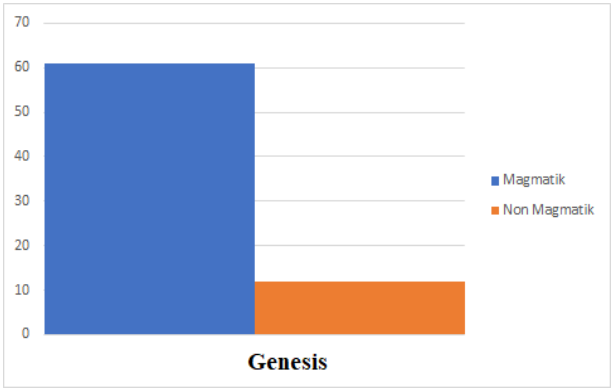
$$P(2|1) = \frac{P(1|2) \times P(2)}{(P(1|2) \times P(2)) + (P(1|2')P(2'))}$$

$$P(2|1) = \frac{1 \times 0{,}82857}{(1 \times 0{,}82857) + (1 \times 0{,}171428)}$$

$$P(2|1) = 0{,}82857 = 82{,}86\ \%$$

Perhitungan probabilitas P(2|1) dengan Teorema Bayes tersebut diperoleh dari penghitungan parameter sebagaimana pada rumus (2). P(1|2) merupakan probabilitas keaktifan Gunung Anak Krakatau ketika erupsi magmatik terjadi yang bernilai 0,82857. P(1|2') merupakan probabilitas keaktifan Gunung Anak Krakatau ketika erupsi non-magmatik terjadi yang bernilai 0,171428. P(2) merupakan probabilitas kejadian erupsi magmatik yang bernilai 1. P(2') merupakan probabilitas kejadian erupsi non-magmatik yang bernilai 0,1428. Nilai P(2') tersebut diperoleh berdasarkan perhitungan dari persamaan (2). Probabilitas P(1|2) dan P(2) tersebut didapatkan dari jumlah erupsi magmatik yang berjumlah 61 dari 73 total kejadian erupsi Gunung Anak Krakatau yang terjadi. Probabilitas (1|2') dan P(2') didapatkan dari jumlah erupsi nonmagmatik yang berjumlah 12 dari 73 total kejadian erupsi Gunung Anak Krakatau. Proses perhitungan yang sama dilakukan untuk memperoleh nilai probabilitas parameter lainnya dengan teorema Bayes.

Perhitungan probabilitas pada P(2|1) menunjukkan bahwa parameter magmatik bernilai 82,86 % dan non-magmatik bernilai 17,14 %. Parameter erupsi magmatik pada pohon kejadian menghasilkan cabang parameter tipe erupsi vulkanian, surtseyan, dan strombolian sedangkan parameter erupsi erupsi non-magmatik menghasilkan cabang parameter erupsi freatik. Nilai probabilitas P(2|1) menunjukkan bahwa faktor magmatik memiliki kemungkinan terbesar untuk menimbulkan erupsi di masa depan. Dalam kurun waktu 1927 hingga 2019, proses magmatik terjadi sebanyak 61 kali dan proses non magmatik terjadi sebanyak 12 kali **(Gambar 5)**. Hal ini menunjukkan bahwa proses magmatik terjadi lebih dominan dibandingkan proses non magmatik.



Gambar 5. Histogram parameter genesis erupsi Gunung Anak Krakatau yang terdiri dari erupsi magmatik dan nonmagmatik.

Berdasarkan data rekaman erupsi Gunung Anak Krakatau tahun 1927 - 2019, tipe erupsi yang pernah terjadi pada Gunung Anak Krakatau antara lain strombolian, vulkanian, surtseyan, dan freatik. Mengacu pada Wright dan Cas (1988), tipe erupsi strombolian merupakan salah satu tipe erupsi ringan yang melontarkan material lapili dan bom volkanik dengan ketinggian puluhan hingga ribuan meter dan terjadi pada interval yang relatif teratur. Tipe erupsi strombolian tidak mempengaruhi pipa magma sehingga dapat terjadi berulang-ulang. Tipe erupsi vulkanian dicirikan oleh kehadiran awan dan gas berisi abu yang berasal dari kawah serta membumbung tinggi pada puncak dari gunung api. Tipe erupsi vulkanian pada umumnya disebabkan oleh aktivitas dapur magma yang kontak dengan air di bawah permukaan sehingga menimbulkan erupsi freatomagmatik. Tipe erupsi surtseyan timbul akibat kontak air laut dengan magma sehingga proses erupsi tersebut mirip dengan erupsi freatomagmatik tetapi, dicirikan dengan lontaran material yang cukup keras, aliran lava secara lokal, dan berlangsung secara kontinu atau ritmik. Tipe erupsi freatik terjadi ketika magma memanaskan air di bawah permukaan tetapi, tidak mengalami kontak secara langsung. Tipe erupsi freatik menghasilkan produk berupa uap, air, debu volkanik, fragmen batuan, dan emisi gas karbon dioksida atau hidrogen sulfida.

Probabilitas P(3|2) merupakan prediksi kejadian tipe erupsi tertentu pada masa yang datang. Tipe erupsi vulkanian memiliki nilai probabilitas terbesar, yaitu 47,14 %. Tipe erupsi strombolian memiliki probabilitas bernilai 34,29 %, tipe erupsi surtseyan bernilai 1,43 %, dan tipe erupsi freatik bernilai 17,14 %. Berdasarkan hasil perhitungan probabilitas, tipe erupsi vulkanian diprediksi paling memungkinkan terjadi di masa depan dan didukung dengan data dari histogram tipe erupsi Anak Krakatau **(Gambar 6)**.

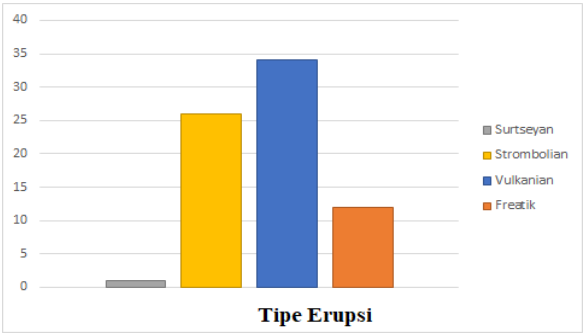
Erupsi gunung api pada lingkungan subaerial mengeluarkan lava, piroklastik, dan gas dalam jumlah tertentu yang tergantung pada tipe erupsinya (Pyle, 2015 dalam Sigurdsson dkk., 2015). Perbedaan tipe erupsi ini menyebabkan adanya perbedaan dalam tingkat eksplosivitasnya masing-masing. Newhall dan Self (1982) mengajukan skala tingkat eksplosivitas yang dikenal sebagai Volcanic Explosivity Index (VEI) untuk menyatakan tingkat eksplosivitas erupsi suatu gunung api. Nilai pada skala VEI **(Tabel 2)** berada pada rentang 0-8 untuk menggambarkan volume erupsi yang dikeluarkan dan tinggi kolom erupsi.

Tabel 2. Skala VEI terhadap fenomena erupsi gunung api (Pyle, 2015 dalam Sigurdsson dkk., 2015).

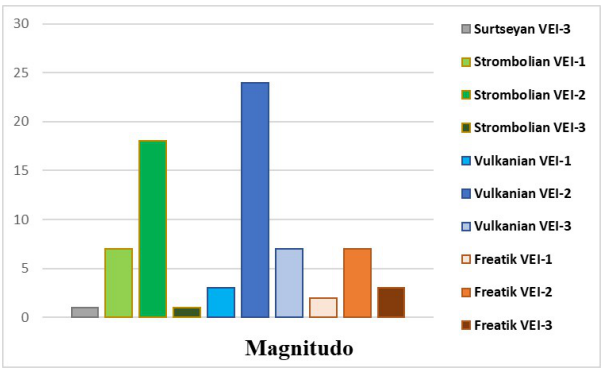
INDEKS	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Volume *bulk* tefra yang dihasilkan (m^3)	$<10^4$	$<10^6$	$<10^7$	$<10^8$	$<10^9$	$<10^{10}$	$<10^{11}$	$<10^{12}$	$<10^{12}$
Tinggi kolom erupsi (km)	< 0,1	0,1-1	1-5	3-15	10-25	>25			
Deskripsi kualitatif	Tenang	Efusif	Eksplosif		Kataklismik, Paroksimal				
Injeksi stratosferik	-	-	-	Mungkin terjadi	Pasti terjadi				
Persentase erupsi 1000 tahun terakhir (%)	13	16	49	14	5	2	< 1	< 0,1	0
Interval perulangan	Harian hingga mingguan			0,3 tahun	3 tahun	20 tahun	80 tahun	500 tahun	7 x 10^5 tahun

Probabilitas P(4|3) merupakan prediksi nilai VEI sebuah tipe erupsi yang terjadi. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tipe erupsi Vulkanian dengan VEI dua merupakan erupsi yang paling mungkin terjadi di masa depan. Prediksi erupsi tersebut didasarkan pada hasil perhitungan probabilitas terbesar pada masing-masing parameter. Histogram nilai VEI untuk

setiap tipe erupsi pada Gunung Anak Krakatau **(Gambar 7)** menunjukkan bahwa tipe erupsi dan magnitudo yang paling sering terjadi adalah vulkanian dengan nilai VEI 2 sebanyak 24 kali.



Gambar 6. Histogram tipe erupsi yang terdiri dari tipe erupsi surtseyan, strombolian, vulkanian, dan freatik.

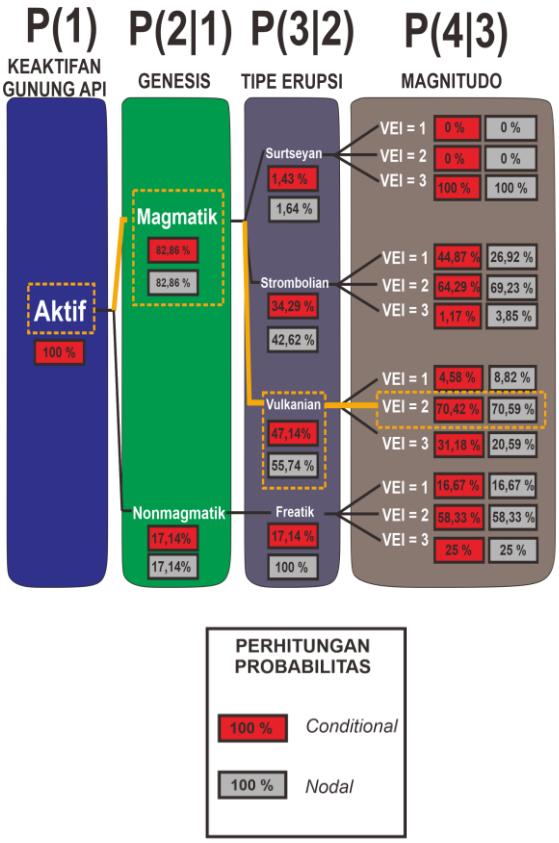


Gambar 7. Histogram magnitudo yang terdiri dari nilai VEI untuk setiap tipe erupsi.

Perhitungan probabilitas secara nodal tersebut berbeda dengan perhitungan secara Teorema Bayes. Perhitungan nodal dilakukan tanpa memperhitungkan parameter sebelumnya telah terjadi sedangkan, perhitungan dengan Teorema Bayes dilakukan dengan memperhitungkan parameter sebelumnya terjadi untuk menyebabkan parameter selanjutnya terjadi.

3.2 Seri Waktu Istirahat

Terdapat 4 kelompok seri waktu istirahat pada Gunung Anak Krakatau berdasarkan nilai VEI pada masing-masing erupsi **(Gambar 9)**. Seluruh nilai VEI memiliki nilai korelasi yang rendah. Grafik nilai VEI 1 memiliki nilai korelasi terendah dibandingkan dengan grafik nilai VEI lainnya dengan variasinya yang relatif lebih tersebar dibandingkan dengan grafik lainnya. Nilai korelasi tertinggi terdapat pada grafik VEI 3 tetapi, grafik tersebut mengindikasikan bahwa erupsi pada saat itu tidak saling berkaitan.



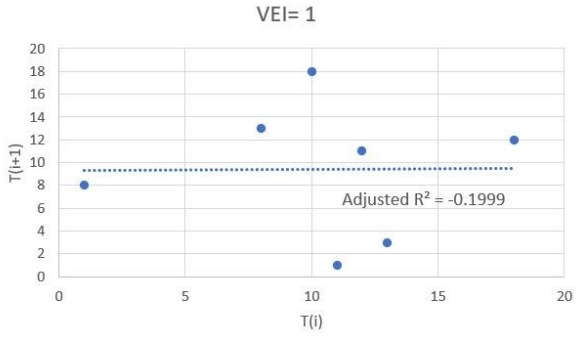
Gambar 8. Pohon kejadian Gunung Anak Krakatau berdasarkan data rekaman erupsi tahun 1927-2019 dengan nilai probabilitas pada masing-masing kejadian.

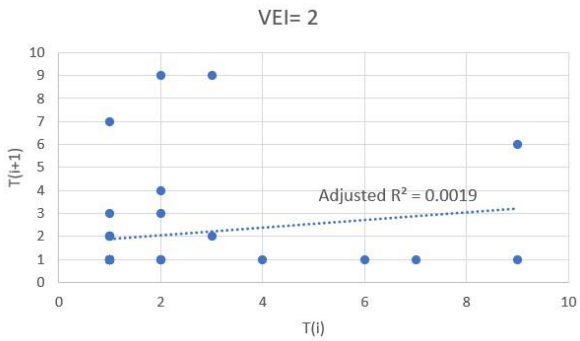
Namun, di sisi lain terdapat perbedaan nilai waktu istirahat yang berbeda jauh. Hal ini berdampak pada keberlangsungan erupsi Gunung Anak Krakatau dengan VEI 3 memerlukan waktu yang lama untuk terjadi. Grafik seri waktu istirahat turut menunjukkan bahwa erupsi dengan VEI 1 dan 2 menunjukkan waktu yang lebih cepat untuk terjadi kembali.

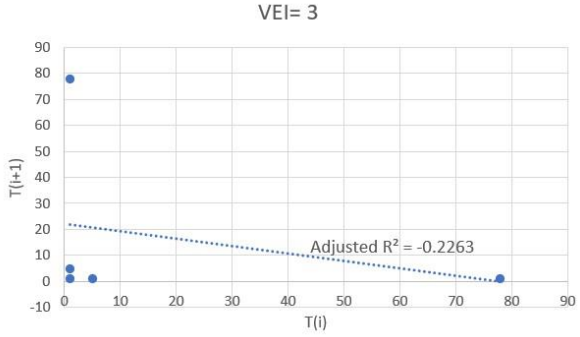
Nilai koefisien determinasi (*Adjusted* R^2) bernilai 0.0019 atau 0.19% pada grafik VEI 2 menunjukkan bahwa waktu istirahat pada T(i)

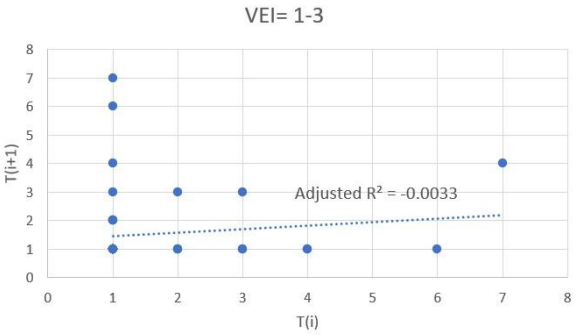
dapat menjelaskan waktu istirahat pada tahun berikutnya (T(i+1)) sebesar 0.19%. Namun, nilai koefisien determinasi ini menyimpulkan faktor lain lebih berperan dalam mempengaruhi erupsi yang terjadi di Gunung Anak Krakatau dibandingkan faktor waktu istirahat pada T(i).

Nilai koefisien determinasi pada grafik seri waktu istirahat VEI 1, VEI 3, VEI 1-3 yang bernilai negatif menunjukkan bahwa waktu istirahat pada T(i) tidak mampu menjelaskan waktu istirahat pada tahun berikutnya (T(i+1)). Dari keempat grafik tersebut menunjukkan persebaran nilai waktu istirahat yang bervariasi dengan nilai korelasi yang sangat rendah menunjukkan bahwa erupsi Anak Krakatau merupakan sebuah proses yang terjadi secara acak dan bersifat independen satu sama lainnya (Cox dan Lewis, 1966).









Gambar 9. Grafik seri waktu istirahat erupsi Gunung Anak Krakatau periode aktivitas 1927-2019.

Erupsi Anak Krakatau yang bersifat independen ini juga berkaitan dengan bervariasinya tipe erupsi yang hadir di Anak Krakatau seperti surtseyan, freatik, strombolian, dan vulkanian. Selain itu, kehadiran dua sumber magma yang berasal dari mantel dan yang berkaitan dengan proses subduksi antara Lempeng Eurasia dan Indo-Australia (Abdurrachman dkk., 2018) serta kehadiran beberapa dapur magma pada berbagai kedalaman (Dahren dkk., 2012) diperkirakan menyebabkan proses erupsi pada Anak Krakatau terjadi secara acak, bersifat independen, dan sering terjadi dengan frekuensi waktu istirahat berkisar 1-7 tahun.

4. DISKUSI

Penulis membuat Pohon kejadian erupsi Gunung Anak Krakatau yang menggambarkan kejadian-kejadian atau aktivitas yang mungkin terjadi di Gunung Anak Krakatau secara detail. Pembangunan pohon kejadian ini berdasarkan data rekaman erupsi tahunan dan dapat digunakan untuk melakukan prediksi jangka panjang. Namun, pohon kejadian ini dapat dimodifikasi untuk keperluan prediksi jangka pendek terutama saat terjadinya krisis atau periode tanggap darurat bencana Gunung Anak Krakatau dengan menggunakan data rekaman erupsi yang lebih rinci seperti data harian maupun mingguan.

Berdasarkan data rekaman erupsi Gunung Anak Krakatau **(Tabel 1)**, Gunung Anak Krakatau tergolong merupakan gunung api yang sangat aktif sehingga dapat diperkirakan bahwa suplai magma menuju dapur magma

terjadi secara terus-menerus. Dapur magma yang tidak dapat menampung volume magma yang berlebih dapat memicu pergerakan magma menuju permukaan. Pergerakan ini dapat menyebabkan terjadinya erupsi magmatik maupun non-magmatik. Namun, pergerakan magma ke permukaan dapat berhenti di kedalaman tertentu karena telah mencapai kesetimbangan tekanan dengan batuan di sekitarnya. Hal ini diindikasikan pernah terjadi pada Gunung Anak Krakatau saat tidak terjadinya erupsi dan hanya menunjukkan aktivitas vulkanisme seperti *degassing* maupun gempa-gempa tremor di sekitar tubuhnya.

Variasi tipe erupsi yang terjadi pada Gunung Anak Krakatau dikontrol oleh laju suplai magma, viskositas magma, dan kestabilan mekanik dari dapur magma (Scandone, 1996). Variasi fenomena erupsi pada Gunung Anak Krakatau juga dapat disebabkan oleh pengaruh eksternal pada mantel di bawah Gunung Anak Krakatau. Pengaruh eksternal tersebut dapat berupa intrusi mantel panas dan material *slab* di bawah Gunung Anak Krakatau yang menunjam sehingga berdampak pada proses pembentukan magma dan menyebabkan perubahan fenomena erupsi dari tahun 1927-2019 (Abdurrachman dkk., 2018). Faktor lain seperti adanya kontak antara magma dengan air laut dapat menyebabkan tipe erupsi freatik ataupun surtseyan. Tipe erupsi vulkanian dengan VEI 2 merupakan skenario yang paling mungkin terjadi pada Gunung Anak Krakatau berdasarkan nilai probabilitas *conditional* dan *nodal* tertinggi di antara yang lain. Namun, kemungkinan bahwa tipe erupsi dengan nilai VEI yang lain juga dapat terjadi pada erupsi Gunung Anak Krakatau di kemudian hari. Hal ini ditunjukkan oleh nilai peluang kejadian erupsi jenis strombolian VEI 2 dan freatik VEI 2 yang nilainya cukup tinggi. Adanya kemungkinan skenario erupsi selain berdasarkan nilai probabilitas dari pohon kejadian karena analisis terhadap seri waktu istirahat menggambarkan bahwa erupsi Gunung Anak Krakatau bersifat independen dan terjadi secara acak. Selain itu, kompleksitas pada kondisi geologi Gunung Anak Krakatau juga berperan terhadap kehadiran skenario lain di luar pohon kejadian yang sudah dibuat. Hal ini dapat diatasi dengan memodifikasi pohon kejadian dengan menambahkan data erupsi terbaru maupun dengan melihat tren dari data erupsi pada rentang waktu tertentu.

Variasi produk erupsi seperti abu, lahar, aliran lava, *pyroclastics density currents* (PDC) dapat terbentuk dalam satu kejadian erupsi (Nakada dkk., 2019). Produk erupsi yang dihasilkan oleh Anak Krakatau selama periode aktivitas 1927-2019 berdasarkan data rekaman erupsi yaitu, material piroklastik berupa abu vulkanik, lapili, dan aliran lava. Periode aktivitas 1927-1961 menghasilkan produk erupsi berupa abu vulkanik dan lapili tetapi, sejak periode aktivitas 1961 fenomena erupsi Gunung Anak Krakatau menghasilkan produk berupa aliran lava dari tipe erupsi strombolian. Tipe erupsi vulkanian dan VEI yang relatif lebih tinggi relatif lebih banyak terekam sebelum tahun 1961 sedangkan selama periode 1961-2019, erupsi lebih bersifat transisi eksplosif. Perubahan sifat erupsi tersebut dapat disebabkan oleh faktor internal magma seperti perubahan *open-system degassing* menjadi *closed-system degassing* ketika eksolusi volatil dan dekompresi magma berlangsung, perubahan kecepatan kenaikan magma, dan nukleasi volatil dalam magma (Cassidy dkk., 2018).

Pada grafik seri waktu istirahat, nilai koefisien determinasi atau *Adjusted R-Squared* negatif pada VEI 1, VEI 3, dan VEI 1-3 dapat disebabkan oleh data atau observasi yang terlalu sedikit, sehingga penelitian selanjutnya dapat menambah jumlah data atau observasi agar didapatkan model yang lebih baik. Namun, keempat nilai koefisien determinasi menegaskan bahwa erupsi di Gunung Anak Krakatau pada tahun 1927-2019 berlangsung secara independen atau tidak saling berkaitan satu sama lain.

Mitigasi terhadap bencana yang disebabkan oleh erupsi Anak Krakatau perlu memperhatikan jenis bencana yang dihasilkan

dan daerah berpenduduk yang pernah terdampak. Berdasarkan data kependudukan (Data kependudukan Provinsi Lampung, 2020) dan observasi lapangan secara langsung pada Februari-Maret 2020, Kompleks Gunung Anak Krakatau tidak dihuni oleh penduduk secara permanen melainkan hanya menjadi tempat singgah maupun tempat memancing oleh para nelayan. Namun, kehadiran nelayan di Kompleks Gunung Anak Krakatau dapat membahayakan diri mereka sendiri karena potensi Anak Krakatau untuk mengalami erupsi masih sangat tinggi. Selain itu, kapal tradisional yang digunakan tidak dilengkapi dengan teknologi yang terhubung dengan pos pemantauan erupsi Anak Krakatau sehingga informasi mengenai aktivitas maupun erupsi gunung api ini tidak tersampaikan. Meskipun begitu, kearifan lokal yang diwariskan secara turun-temurun mengenai aktivitas vulkanisme Gunung Anak Krakatau dipertahankan oleh nelayan untuk menghindari bahaya erupsi dari Anak Krakatau. Hal ini terbukti saat erupsi dan tsunami Desember 2018 saat beberapa nelayan dan tim patroli Krakatau dari Balai Konservasi Sumber Daya Alam Wilayah Lampung berhasil menyelamatkan diri dengan memperhatikan aktivitas vulkanisme di Anak Krakatau.

Wilayah dengan penduduk terdekat di sekitar Anak Krakatau berada di Pulau Sebesi yang berjarak sekitar 19 km dari Anak Krakatau. Pulau ini sering terdampak oleh abu vulkanik saat erupsi Anak Krakatau dan juga tsunami pada erupsi Anak Krakatau Desember 2018. Penyebaran abu vulkanik sangat terpengaruh oleh arah dan kecepatan angin sehingga terkadang dapat tersebar hingga daerah pesisir Lampung dan Banten. Abu vulkanik terdiri dari material vitrik, kristal, dan litik yang berbentuk runcing dan bersifat abrasif. Kehadiran mineral-mineral yang bersifat asam menyebabkan abu vulkanik beracun dan bersifat korosif (Wilson dan Stewart, 2013 dalam Bobrowsky, 2013). Abu vulkanik dapat menyebabkan terjadinya kerusakan pada bangunan terutama jika ketebalan yang terbentuk cukup tebal. Selain itu, juga dapat membahayakan pertanian dan peternakan hingga menyebabkan gagal panen. Pada bidang kesehatan, abu vulkanik yang terhirup dapat menyebabkan terjadinya iritasi pada sistem saluran pernafasan.

Dalam mitigasi terhadap bencana yang ditimbulkan oleh penyebaran abu vulkanik (Wilson dkk., 2015) diperlukan suatu model yang menggambarkan penyebaran abu vulkanik sehingga dapat menyediakan kepada komunitas yang terdampak dengan peringatan yang lebih efektif dan tepat waktu. Adanya perencanaan awal mengenai upaya pembersihan abu vulkanik dan pemulihan sektor yang terdampak dapat menekan biaya yang digunakan serta mengoptimalkan upaya yang dilakukan serta penerapan protokol standar mengenai karakteristik fisik dan kimia abu vulkanik yang dikeluarkan oleh *International Volcanic Health Hazard Network (IVHHN)* juga dapat membantu penanggulangan dampak akibat penyebaran abu vulkanik.

Selain itu, bahaya tsunami seperti pada Desember 2018 juga perlu mendapatkan perhatian khusus karena mitigasi terhadap tsunami yang dihasilkan atau berkaitan dengan aktivitas gunung api di Indonesia tidak banyak dilakukan. Erupsi Anak Krakatau yang sering terjadi mengeluarkan produk erupsi seperti piroklastik dan aliran lava yang membangun tubuh Anak Krakatau. Akibatnya adalah laju pertumbuhan gunung api ini mencapai 4 m/tahun (Sutawidjaja, 1997) yang menyebabkan Anak Krakatau dapat mencapai atau bahkan melebihi ketinggiannya sebelum kejadian Desember 2018. Produk erupsi yang dihasilkan berupa piroklastik yang bersifat lepas maupun akibat kontak antara perselingan aliran lava dan material piroklastik dapat memicu terjadinya longsoran yang kemudian dapat menghasilkan tsunami. Tsunami yang disebabkan oleh letusan gunung api juga pernah terjadi pada Erupsi Krakatau 1883 yang menghasilkan tsunami hingga mencapai ketinggian 30 meter (Simkin & Fiske, 1983). Mitigasi terhadap tsunami di Selat Sunda perlu dikembangkan di wilayah pesisir Lampung, Banten, dan pulau-pulau berpenduduk di Selat

Sunda. Menurut Eisner (2005) terdapat tujuh langkah untuk melakukan mitigasi terhadap bencana tsunami, yaitu:

1. Menentukan risiko, bahaya, dan kerentanan terhadap masyarakat yang terdampak;
2. Menghindari pembangunan baru di daerah yang rawan atau pernah terdampak;
3. Melakukan rekayasa terhadap konstruksi yang dibangun di daerah rawan atau yang pernah terdampak;
4. Membangun bangunan yang tahan terhadap tsunami;
5. Melindungi bangunan yang sudah dibangun dengan perlindungan khusus;
6. Mengambil tindakan pencegahan khusus terhadap fasilitas vital; dan
7. Membuat rencana evakuasi.

Penulis menilai dalam melakukan mitigasi bencana terhadap Gunung Anak Krakatau diperlukan adanya pemodelan terhadap penyebaran abu vulkanik dan penjalaran gelombang tsunami yang dinilai penting untuk meningkatkan ketahanan terhadap bencana yang disebabkan oleh aktivitas Gunung Anak Krakatau.

5. KESIMPULAN

Perhitungan probabilitas berdasarkan Teorema Bayes yang disusun di sebuah pohon kejadian pada data rekaman erupsi Gunung Anak Krakatau pada periode aktivitas 1927 - 2019 menunjukkan bahwa erupsi vulkanian dengan VEI 2 merupakan skenario yang paling memungkinkan terjadi di waktu yang datang. Hal tersebut disebabkan karena genesis erupsi magmatik dengan tipe erupsi vulkanian dan VEI 2 menunjukkan nilai probabilitas terbesar baik secara *conditional* maupun *nodal*. Analisis grafik seri waktu istirahat Gunung Anak Krakatau menunjukkan bahwa erupsi yang terjadi bersifat independen dan acak sehingga terdapat kemungkinan adanya skenario erupsi lain di luar pohon kejadian yang sudah dibuat. Hal ini dapat diatasi dengan menambahkan data erupsi terbaru pada pohon kejadian atau dengan melihat tren dari data erupsi dalam rentang waktu tertentu. Penulis menilai bahaya dari abu vulkanik dan tsunami karena erupsi Gunung Anak Krakatau perlu mendapat perhatian khusus. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut berkaitan dengan pemodelan penyebaran produk erupsi Gunung Anak Krakatau dan pemodelan tsunami diperlukan untuk menyusun skema mitigasi yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

Abdurrachman, M., Widiyantoro, S., Priadi, B., dan Ismail, T. (2018): Geochemistry and Structure of Krakatoa Volcano in the Sunda Strait, Indonesia: *Geosciences*, **8**(4), 111-121.

Annen, C., Blundy, J. D., dan Sparks, R. S. J. (2006): The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones. *Journal of Petrology*, **47**(3), 505-539.

Aspinall, W., dan Cooke, R. M. (1998): Expert judgment and the Montserrat Volcano eruption. *Proceedings of the 4th international conference on Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM4*, ***3***, 13-18.

Cassidy, M., Manga, M., Cashman, K., Bachmann, O. (2018): Controls on Explosive - Effusive Eruptions Styles. *Nature Communications*, **9**(1), 1-16.

Cox, D. R., dan Lewis, P. A. W. (1966): *The statistical analysis of Series of Events*, Springer, Netherlands, 285 hal.

Dahren, B., Troll, V. R., Andersson, U. B., Chadwick, J. P., Gardner, M. F., Jaxybulatov, K., dan Koulakov, I. (2012): Magma plumbing beneath Anak Krakatau volcano, Indonesia: evidence for multiple magma storage regions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **163**(4), 631-651.

Eisner, R. K. (2005): Planning for Tsunami: Reducing Future Losses through Mitigation. *Natural Hazards*, **35**(1), 155-162.

Giachetti, T., Paris, R., Kelfoun, K., dan Ontowirjo, B. (2012): Tsunami hazard related to a flank collapse of Anak Krakatau Volcano, Sunda Strait,

Indonesia. *Geological Society of London Special Publications*, **361**(1), 79-90.

Gunawan, H. (2008): Laporan Kemajuan Penelitian Gunung Anak Krakatau Lampung Selatan. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bandung.

Jaxybulatov, K., Koulakov, I., Ibs-von Seht, M., Klinge, K., Reichert, C., Dahren, B., dan Troll, V. R. (2011): Evidence for High Fluid/Melt Content beneath Krakatau Volcano (Indonesia) from Local Earthquake Tomography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **206**(3-4), 96-105.

Mandeville, C. W., Carey, S., dan Sigurdsson, H. (1996): Magma mixing, Fractional Crystallization and Volatile Degassing during the 1883 Eruption of Krakatau volcano, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **74**(3-4), 243-274.

Nakada, S., Maeno, F., Yoshimoto, M., Hokanishi, N., Shimano, T., Zaennudin, A., dan Iguchi, M. (2019). Eruption Scenarios of Active Volcanoes in Indonesia. *Journal of Disaster Research*, **14**(1), 40-50.

Newhall, C. G. (1982): *A Method for estimating intermediate and long-term risks from volcanic activity, with an example from Mount St. Helens, Washington (Open File Report No. 82-396)*, U.S. Geological Survey, U.S.A., 62 halaman.

Newhall, C. G., dan Self, S. (1982): The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **87**(C2), 1231-1238.

Newhall, C. G. (1984): *Semi-quantitative assessment of changing volcanic risk at Mount St. Helens, Washington (Open File Report No. 84-272)*. U.S. Geological Survey, U.S.A., 30 hal.

Newhall, C., dan Hoblitt, R. (2002): Constructing event trees for volcanic crises. *Bulletin of Volcanology*, **64**(1), 3-20.

Nishimura, S., Harjono, H., dan Suparka, S. (1992): The Krakatau Islands: the geotectonic setting. *GeoJournal*, **28**(2), 87-98.

Punongbayan, R. S., Bautista, M. L. P., Harlow, D. H., Newhall, C. G., dan Hoblitt, R. P. (1996): Pre-Eruption Hazard Assessments and Warnings, 67-85, *dalam* Newhall, C. G., Punongbayan, R. S., (ed.). (1996). *Fire and Mud : Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*, Philippines Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City, 1126 halaman.

Pyle, D. M. (2015): Sizes of volcanic eruptions, 257-264, *dalam* Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., dan Stix, J. (Ed.). (2015). *The Encyclopedia of Volcanoes*, 1456 halaman, Academic Press, U.S.A. .

Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (2014): *Data Dasar Gunung Api : Krakatau*. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bandung, 26 hal.

Rasjid, S.A. (1990): Perkembangan Anak Krakatau sebelum dan sesudah Letusan Th. 1883, Direktorat Vulkanologi, Bandung.

Scandone, R. (1996): Factors Controlling the Temporal Evolution of Explosive Eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **72**(1-2), 71-83.

Siebert, L., Simkin, T., dan Kimberly, P. (2011): *Volcanoes of the World*, Univ of California Press, U.S.A., 568 halaman.

Simkin, T., dan Fiske, R. S. (1983): Krakatau 1883: a Centennial Retrospective on the Eruption and its Atmospheric Effects. *Weatherwise*, **36**(5), 244-254.

Sutawidjaja, I. S. (1997): The Activities of Anak Krakatau Volcano during the Years of 1992-1996. *Disaster Prevention Research Institute Annual*, **40**, 13-22.

Varley, N., Johnson, J., Ruiz, M., Reyes, G., Martin, K., de Ciencias, F., dan Colima, M. (2006): Applying Statistical Analysis to Understanding the Dynamics of

Volcanic Explosions. *Statistics in Volcanology*, **1**, 57-76.

Wilson, T.M., dan Stewart, C. (2013): Volcanic Ash, 120-150 *dalam* Bobrowsky, P.T. (Ed.). (2013). *Encyclopedia of Natural Hazards*, 1000 halaman, Springer, New York.

Wilson, T. M., Jenkins, S., dan Stewart, C. (2015): Impacts from Volcanic Ash Fall. In Volcanic Hazards, Risks and Disasters (pp. 47-86). Elsevier.

Wickman, F. E. (1976): Markov Models of Repose-Period Patterns of Volcanoes, 135-161 *dalam* Merriam, D. F., *Random Processes in Geology*, Springer, Berlin, 168 halaman.

Wright, J. V., dan Cas, R. A. F. (1988): *Volcanic Successions, Modern and Ancient: a Geological Approach to Processes, Products, and Successions*. Springer Science & Business Media, London, 528 halaman.

Wright, H. M. N., Pallister, J. S., McCausland, W. A., Griswold, J. P., Andreastuti, S., Budianto, A., Primulyana, S., Gunawan, H., dan 2013 VDAP CVGHM Event Tree Team (2018): Construction of Probablistic Event Trees for Eruption Forecasting at Sinabung Volcano, Indonesia 2013-2014, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **382**, 233-252.

Zen, M. T. (1969): The State of Anak Krakatau in September 1968. *Bulletin of National Institute of Geology and Mining*, **2**(1), 15-23.

Zen, M. T., dan Hadikusumo, D. (1964): Recent Changes in the Anak-Krakatau Volcano. *Bulletin Volcanologique*, **27**(1), 259-268.

SUMBER DARI INTERNET

Data kependudukan Provinsi Lampung 2010-2019, diakses dari laman https://lampung.bps.go.id/ pada 17 Oktober 2020.

Database Krakatau 1883-2019 dari Global Volcanism Program, diakses dari laman https://volcano.si.edu/ pada Desember 2019 – Januari 2020.