

## Analisis Statistik Temporal Erupsi Gunungapi di Indonesia

### *Temporal Statistical Analysis of the Volcanic Eruptions in Indonesia*

Desi Kiswiranti

Jurusan Fisika FMIPA UGM

#### Abstrak

Pada penelitian ini, akan diterapkan tiga metode statistik temporal yaitu distribusi eksponensial, distribusi Weibull dan distribusi Log-Logistik untuk melihat pola erupsi gunungapi di Indonesia. Secara umum, distribusi log-logistik memberikan nilai probabilitas letusan tertinggi yang terjadi dalam waktu tertentu di masa depan dengan aras keyakinan 95%. Pola erupsi gunungapi di Indonesia tidak berdistribusi normal, melainkan acak (random). Secara kualitatif, letusan terbesar akan mengikuti interval waktu istirahat terpanjang. Namun demikian, pada penelitian ini besarnya *repose time* tidak berpengaruh secara nyata terhadap besarnya indeks letusan VEI serta tidak mempengaruhi besarnya kebolehjadian terjadinya erupsi gunungapi di Indonesia. Besarnya rata-rata energi potensial erupsi gunungapi di Indonesia periode tahun 1800-2012 sebesar  $1,13 \times 10^{24}$  erg dan rata-rata energi thermal erupsi gunungapi periode tahun 1800-2012 sebesar  $1,30 \times 10^{24}$  erg. Oleh karena itu, energi total erupsi gunungapi di Indonesia sebesar  $2,42 \times 10^{24}$  erg.

**Kata kunci:** repose time, distribusi Weibull, distribusi Log-Logistik, metode statistik, erupsi gunungapi.

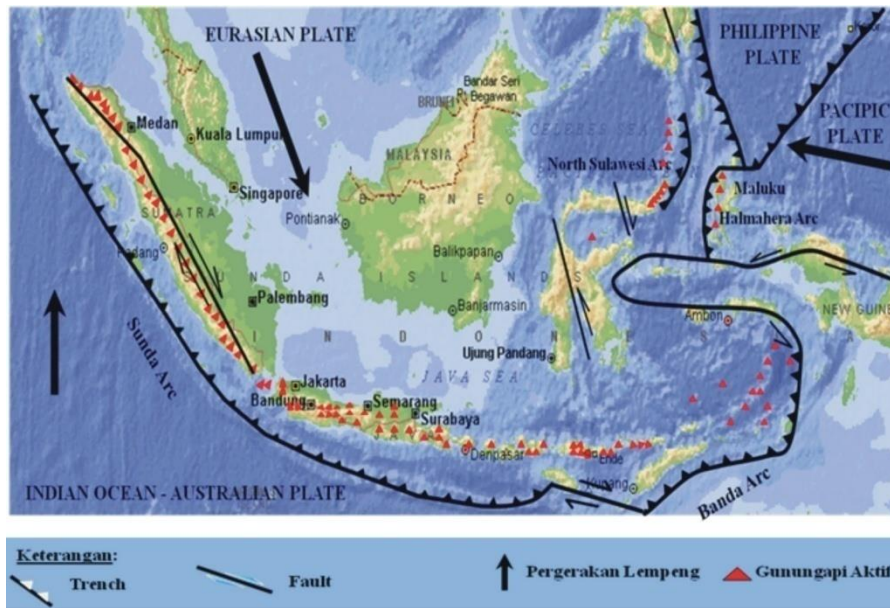
#### Abstract

In this study, three temporal statistical methods applied to understand the eruption pattern of volcanoes in Indonesia, i.e. exponential distribution, Weibull distribution and Log-Logistic distribution. In general, the log-logistics distribution provides the highest probability of eruption that occurred within a specific time in the future with a 95% confidence level. Pattern of volcanic eruption in Indonesia are not normally distributed or random. Qualitatively, the biggest eruption will follow the longest repose time interval. However, the magnitude of repose times no influence on the magnitude of VEI and doesn't affect to the probability of occurrence the volcanic eruptions in Indonesia. The average potential energy of the volcanic eruption in Indonesia period 1800-2012 amounted to  $1,13 \times 10^{24}$  ergs and the average thermal energy of the volcanic eruption period 1800-2012 amounted to  $1.30 \times 10^{24}$  ergs. Therefore, the total energy of the volcanic eruption in Indonesia amounted to  $2,42 \times 10^{24}$  ergs.

**Keywords:** repose time, Weibull distribution, Log-Logistik distribution, statistical methods, volcanic eruption.

## 1. Pendahuluan

Indonesia berada pada jalur pertemuan antara lempeng tektonik India-Australia yang menunjam di dasar Samudra Indonesia yang bertumbukan dengan lempeng Eurasia (Gambar 1). Pada Indonesia bagian timur terdapat juga lempeng Pasifik yang bertumbukan dengan lempeng Eurasia. Pada jalur tumbukan ini, terdapat hampir 13% gunungapi di dunia (129 buah gunungapi aktif) yang berpotensi menimbulkan bencana alam dengan intensitas dan kekuatan yang berbeda-beda.



Gambar 1. Jalur gunungapi dan lempeng tektonik Indonesia (Palmadi, 2011)

Indikasi adanya aktivitas suatu gunungapi diantaranya adalah pertumbuhan kubah lava dan letusan piroksimal yang kadangkala disertai awan panas (Katili dan Siswamidjojo, 1994). Aktivitas gunungapi yang membahayakan adalah letusan yang disertai awan panas, semburan gas beracun serta aliran lava pijar. Besarnya letusan sebuah gunungapi dapat dihitung berdasarkan indeks eksplosivitas gunungapi yang disebut VEI (*Volcanic Explosivity Index*). VEI dikemukakan oleh Newhall (1982) dari U.S. Geological Survey dan Universitas Hawaii yang digunakan untuk mengukur besarnya letusan gunungapi. VEI setara dengan logaritma berbasis 10 dari volume produk erupsi. VEI=1 setara dengan 0,1 juta m<sup>3</sup> volume produk erupsi, VEI=2 setara 1 juta m<sup>3</sup>, VEI=3 setara 10 juta m<sup>3</sup>, VEI=4 setara 100 juta m<sup>3</sup>, dan seterusnya.

Secara kualitatif, letusan terbesar akan mengikuti interval waktu istirahat terpanjang yaitu lebih besar dari 100 tahun (Simkin dan Siebert 1984, 1994). Variasi waktu istirahat pada umumnya sebanding dengan tingkat energi letusan yang mengikutinya. Apabila waktu istirahat antar erupsi pendek, biasanya energi pada erupsi yang mengikutinya juga kecil, sebaliknya apabila waktu istirahatnya panjang maka energi dari erupsi yang mengikutinya juga besar. Hal ini disebabkan oleh adanya penimbunan energi dalam waktu yang relatif lama. Waktu istirahat dan besarnya letusan selama proses erupsi secara mendasar berbeda karena perilaku pengendali selama tahap pertumbuhan aktif suatu gunungapi cenderung mempunyai waktu istirahat yang lama. Metode statistik dapat diterapkan untuk menjelaskan perilaku erupsi gunungapi maupun untuk membantu peramalan aktivitas erupsi gunungapi yang akan datang. Selain itu, analisis statistik juga dapat digunakan untuk mengungkapkan struktur yang tersembunyi dalam pola perilaku erupsi gunungapi. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan studi mengenai karakteristik pola letusan gunungapi aktif di Indonesia dengan menggunakan data *repose time* secara statistik temporal.

## 2. Volcanic Explosivity Index (VEI)

Jumlah volume material, ketinggian asap erupsi, dan observasi kualitatif (dengan menggunakan istilah gentle sampai mega-colossal), digunakan untuk menentukan tingkat/nilai exploitas letusan (tabel 3.2). VEI merupakan skala logaritmik yang berarti gunung api dengan angka lima adalah 10 kali lebih kuat dari yang berukuran empat. Skala paling tinggi (magnitude 8) diberikan untuk letusan terbesar dalam sejarah. Magnitude 0

diberikan untuk erupsi yang non-explosif ( $<10^4 \text{ m}^3$  material yang dikeluarkan), Magnitude '8' merepresentasikan erupsi explosif (disertai ledakan) Mega-Kolosal yang mampu menyemburkan material  $10^4 \text{ m}^3$  material dan mempunyai kolom asap setinggi lebih dari 25 kilometer. Setiap interval (magnitudo) dalam skala mereprentasikan kelipatan logaritmik 10.

### 3. Energi Erupsi Gunungapi

Yokoyama (1956) memperkirakan energi pada saat letusan gunungapi terbagi dalam berbagai bentuk, yaitu:

a. Energi Kinetik.

Energi kinetik diwakili oleh kecepatan dan massa dari material piroklastik saat dikeluarkan dari kawah. Energi kinetik dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \tag{1}$$

dengan:  $E_k$  = Energi kinetik (Joule);  $m$  = massa piroklastik (kg);  $v$  = kecepatan aliran piroklastik (m/s)

b. Energi Potensial.

Energi potensial diwakili oleh perubahan tingkat lava pada lubang/vent gunungapi selama terjadi letusan. Energi letusan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E_p = mgh \tag{2}$$

dengan  $E_p$ = energi potensial (Joule);  $m$  = total massa material hasil erupsi (kg);  $h$  = tinggi kolom asap saat letusan (m)

**Tabel 1.** Rata-rata energi potensial erupsi gunungapi di Indonesia

No	Nama	Energi Potensial (ergs)
1	Sumatra	3,60541 x 1020
2	Krakatau	8,55281 x 1023
3	Jawa	3,93885 x 1021
4	Nusa Tenggara	2,63823 x 1023
5	Laut Banda	1,48786 x 1019
6	Sangihe Islands	5,80287 x 1020
7	Halmahera	2,84383 x 1020
8	Sulawesi	1,5881 x 1021

c. Energi Thermal.

Energi thermal diwakili oleh kuantitas panas lava dan gas dari fragmen masing-masing gunungapi. Persamaan yang digunakan oleh Yokoyama untuk suhu tinggi  $> 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  sebagai berikut:

$$E_{th} = V\sigma(T\alpha + \beta)J \tag{3}$$

dengan:  $E_{th}$  = energi termal;  $V$  = volume ejecta;  $\sigma$  = densitas rata-rata;  $T$  = temperature lava;  $\alpha$  = specific heat lava,  $0,25 \text{ cal/gr } ^\circ\text{C}$ ;  $\beta$  = panas laten lava,  $50 \text{ cal/gr } ^\circ\text{C}$ ;  $J$  = kerja yang setara dengan panas,  $4,1855 \cdot 10^7 \text{ ergs}$ .

Untuk suhu rendah ( $<1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) persamaannya menjadi:

$$E_{th} = V\sigma T\alpha J \tag{4}$$

Dengan:  $E_{th}$  = energi termal;  $V$  = volume ejecta;  $\sigma$  = densitas rata-rata;  $T$  = temperature lava;  $\alpha$  = specific heat lava (ketika  $T=800 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\alpha=0,25 \text{ cal/gr } ^\circ\text{C}$  dan saat  $T=300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\alpha=0,20 \text{ cal/gr } ^\circ\text{C}$ );  $J$  = kerja yang setara dengan panas,  $4,1855 \cdot 10^7 \text{ ergs}$ .

**Tabel 2.** Rata-rata energi thermal erupsi gunungapi di Indonesia

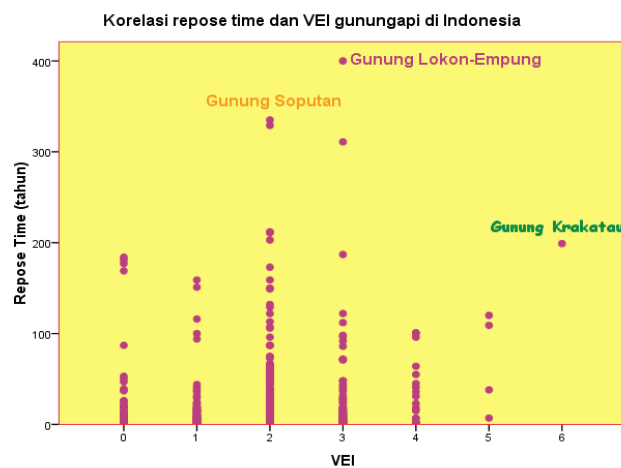
No	Nama	Energi Thermal (ergs)
1	Sumatra	$2,26129 \times 10^{22}$
2	Krakatau	$1,36289 \times 10^{24}$
3	Jawa	$1,52341 \times 10^{23}$
4	Nusa Tenggara	$5,84557 \times 10^{24}$
5	Laut Banda	$2,88474 \times 10^{22}$
6	Sangihe Islands	$1,51648 \times 10^{23}$
7	Halmahera	$6,99304 \times 10^{22}$
8	Sulawesi	$1,02628 \times 10^{23}$

#### 4. Analisis Statistik Temporal Erupsi Gunungapi

Erupsi gunungapi merupakan sistem kompleks yang dikontrol oleh dinamika non linier sehingga sangat sulit untuk dimodelkan secara numerik. Metode statistik dapat digunakan untuk menjelaskan perilaku gunungapi dan untuk membantu peramalan aktivitas gunungapi yang akan datang. Analisis statistik temporal dilakukan pada deret waktu istirahat gunungapi di Indonesia.

##### 4.1 Analisis Korelasi

Analisis korelasi merupakan salah satu teknik statistik yang digunakan untuk menganalisis hubungan antara dua variabel atau lebih yang bersifat kuantitatif. Terdapat tiga macam bentuk hubungan antar variabel, yaitu hubungan simetris, hubungan sebab akibat (kausal) dan hubungan interaktif (saling mempengaruhi). Untuk mencari hubungan antara dua variabel atau lebih dilakukan dengan menghitung korelasi antar variabel yang akan dicari hubungannya.



**Gambar 2.** Korelasi antara *repose time* dengan VEI gunungapi di Indonesia

Korelasi merupakan angka yang menunjukkan arah dan kuatnya hubungan antar variabel atau lebih. Artinya dinyatakan dalam bentuk hubungan positif atau negatif, sedangkan kuatnya hubungan dinyatakan dalam besarnya koefisien korelasi. Hubungan dua variabel atau lebih dinyatakan positif, bila nilai satu variabel ditingkatkan, maka akan meningkatkan variabel yang lain, dan sebaliknya bila nilai satu variabel diturunkan maka akan menurunkan variabel yang lain. Pada penelitian ini, untuk menentukan korelasi digunakan software SPSS 16. Secara umum, hasil uji korelasi menunjukkan lemahnya hubungan antara *repose time* dan VEI (saling independen).

## 4.2 Distribusi Eksponensial

Secara statistik distribusi runtun waktu erupsi gunungapi dapat dinyatakan sebagai mempunyai distribusi eksponensial (Wickmann, 1966),

$$N(\lambda, \tau) = N_0(e^{-\lambda\tau}) \quad (5)$$

dengan,  $N$  = Cacah erupsi yang mempunyai waktu istirahat lebih lama dari pada  $t$ ;  $N_0$  = Cacah erupsi yang mempunyai waktu istirahat lebih lama dari pada 0 tahun;  $\tau$  = Waktu istirahat;  $\lambda$  = Koefisien atenuasi eksponensial.

Runtun waktu erupsi gunungapi mempunyai Fungsi Densitas Kebolehjadian (PDF, *Probability Density Function*, Wickmann, 1966) tidak terjadinya erupsi,

$$\text{PDF Tidak Erupsi } (\lambda, \tau) = \lambda\tau(e^{-\lambda\tau}) \quad (6)$$

Fungsi PDF Tidak Erupsi  $(\lambda, t)$  ini dapat dikategorikan sebagai fungsi distribusi statistik Poissonian. Fungsi PDF terjadinya erupsi dapat dirumuskan pada persamaan (7), dan hasil perhitungan dapat dilihat pada lampiran 1.

$$\text{PDF Erupsi } (\lambda, \tau) = 1 - \lambda\tau(e^{-\lambda\tau}) \quad (7)$$

## 4.3 Distribusi Weibull

Analisis Weibull dari waktu istirahat (*repose time*) yang memungkinkan deskripsi kuantitatif, stasioner dan non-stasioner deret waktu melalui bentuk distribusi parameter. Uji kebebasan waktu diterapkan pada bagian-bagian dari deret yang diasumsikan, tidak menjamin bahwa seluruh deret telah stasioner. Distribusi Weibull biasa digunakan dalam analisis kegagalan dan keberhasilan diterapkan pada berbagai gunungapi (Ho, 1991; Bebbington dan Lai, 1996a, b; Watt et al, 2007):

$$S_{WB}(t) = \exp\{-(\lambda t)^\alpha\} \quad (8)$$

di mana  $\alpha$  adalah parameter daya, biasanya disebut sebagai "parameter bentuk". Untuk  $\alpha = 1$ , distribusi Weibull meliputi distribusi eksponensial sebagai kasus khusus, tetapi juga mengakomodasi kemungkinan meningkatkan atau menurunkan tingkat bahaya jika  $\alpha > 1$  atau  $\alpha < 1$ .

Distribusi Weibull merupakan model kegagalan sederhana yang menggambarkan skenario yang menganggap bahwa kegagalan tersebut sebagai akibat dari proses yang dominan dalam sistem. Menurut ilmu vulkanologi, ini bisa diproyeksikan untuk waktu istirahat pematangan magma antara letusan dalam pola berkelanjutan atau deret waktu yang teratur, dan awal terjadinya erupsi saat tekanan gas melalui diferensiasi magma melampaui ambang batas kritis. Dalam skenario seperti itu, nilai  $\alpha$  dapat digunakan untuk mengekspresikan perubahan misalnya dalam tingkat penambahan ruang sumber dangkal dari sumber yang lebih dalam, sehingga peristiwa akan semakin menurun.

## 4.4 Distribusi Log-logistik

Suatu parameter tertentu dapat meningkatkan kemungkinan letusan, sementara parameter yang lainnya akan menyebabkan penurunan probabilitas letusan. Misalnya, penutupan lubang antara letusan yang dikombinasikan dengan gas permanen, maka akumulasi *volatil* dalam lelehan melalui penyimpanan magma di tempat dangkal, akan mengarah pada proses umpan balik positif dari peningkatan tekanan, sehingga memberikan kontribusi untuk peningkatan probabilitas ledakan. Sebaliknya, proses seperti degassing sistem terbuka, akan memberikan tekanan yang terus-menerus diam, karena itu agak mengarah ke relaksasi dari sistem dan menurunkan kemungkinan letusan. Faktor yang mempengaruhi tersebut dapat dirumuskan dengan distribusi log-logistik (distribusi Pareto III):

$$S_{log}(t) = \frac{1}{1+(t/b)^\alpha} = \frac{1}{1+(\alpha t)^\gamma} \quad (9)$$

yang mencakup parameter skala  $a$  dan  $b$  serta parameter bentuk  $\alpha$ .

Dua parameter probabilitas fungsi densitas log logistik meliputi parameter untuk skala  $\alpha$  dan bentuknya  $\gamma$ . Penggunaan distribusi log logistik dalam vulkanologi terbatas pada studi tentang interval waktu istirahat pada setiap letusan (Connor et al. 2003). Sebuah distribusi log-logistik terkadang dapat mencapai kecocokan, terutama untuk interval waktu istirahat yang sangat panjang atau pendek (Connor et al., 2003).

## 5. Kesimpulan dan Saran

### Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat dirumuskan dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1 Indeks letusan VEI tidak berkorelasi dengan *repose time* (dengan kata lain VEI dan *repose time* saling independen). Hal ini disebabkan karena masing-masing gunungapi mempunyai karakteristik dan komposisi kandungan magma yang berbeda-beda. Selain itu, ada faktor lain yang dapat mempengaruhi besarnya letusan seperti adanya pengaruh tekanan gas dari dalam, adanya gempa tektonik, topografi, dsb.
- 2 Berdasarkan histogram dari *repose time* dan VEI, secara umum pola erupsi gunungapi di Indonesia merupakan pola yang acak (random) sehingga untuk menentukan tingkat probabilitas letusan diperlukan data yang lebih lengkap dan akurat.
- 3 Rata-rata energi potensial erupsi gunungapi di Indonesia periode 1800-2012 sebesar  $1,12587 \times 10^{27}$  ergs dan rata-rata energi thermal erupsi gunungapi periode 1800-2012 sebesar  $1,29537 \times 10^{24}$  ergs. Oleh karena itu, energi total erupsi gunungapi di Indonesia sebesar  $2,42124 \times 10^{24}$  ergs.
- 4 Runtun waktu erupsi gunungapi di Indonesia mempunyai karakteristik stokastik acak, dengan cacah erupsi sebagai fungsi waktu istirahat sertalamanya waktu istirahat tidak mempengaruhi besarnya kebolehjadian terjadinya erupsi gunungapi di Indonesia.
- 5 Secara umum, dari ketiga distribusi yang digunakan dalam perhitungan probabilitas erupsi gunungapi (eksponensial Poisson, Weibull dan Log-Logistik), nampak bahwa distribusi eksponensial Poisson memberikan nilai probabilitas letusan tertinggi yang terjadi dalam waktu tertentu di masa depan dengan aras keyakinan 95 %. Distribusi Weibull cocok digunakan untuk waktu istirahat yang pendek, sedangkan distribusi Log-logistik cocok digunakan untuk waktu istirahat yang lebih panjang.

### Saran

Penelitian ini hanyalah sebagian kecil dari usaha mempelajari ilmu kebumih, khususnya tentang analisis statistik erupsi gunungapi. Masih ada penelitian lain yang mengkaji analisis statistik erupsi gunungapi dengancara yang berbeda. Penelitian lanjutan yang disarankan adalah perlunya pengembangan yang lebih lanjut tentang metode analisis statistik vulkanologi agar aras keyakinannya semakin besar (mendekati 100 %) sehingga dapat memprediksi probabilitas erupsi yang akan datang dengan lebih tepat.

### Daftar Pustaka

- Bebbington, M. S and Lai, C. D, 1996a, *Statistical Analysis of New Zealand Volcanic Occurrence Data*, Journal of Volcanology and Geothermal Research Vol. 74, p. 101-110.
- Bebbington, M. S and Lai, C. D, 1996b, *On Nonhomogenous Models for Volcanic Eruptions*, Math. Geol. 28/5, p.585-600 .
- Connor, Charles B, Sparks, R. S. J, Mason, R. M, Bonadonna, Costanza and Young, S.R, 2003, *Exploring links between physical and probabilistic models of volcanic eruptions: The Soufriere Hills Volcano, Montserrat*, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 30, NO. 13: 1701.

- Ho, C. H, 1991, *Time Trend Analysis of Basaltic Volcanism for The Yukka Mountain Site*, Journal of Volcanology and Geothermal Research Vol. 46, p. 61-72.
- Newhall, G., Christopher and Self, Stephen, 1982, *The Volcanic Explosivity Index (VEI)' An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism*, Journal of Geophysical Research, Vol. 87, No. C2, Pages 1231-123.
- Katili, J.A. dan Siswamidjojo, S.S, 1994, Pemantauan Gunungapi di Filipina dan Indonesia. Ikatan Ahli Geologi Indonesia (IAGI), ISBN: 979-8126-05-6. 321 h + xii.
- Newhall, C, 2004, Promise and pitfalls in eruption forecasting, in Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Volcanic Ash and Aviation Safety, June 21-24, 2004, Alexandria, Virginia: Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, session2p.3-7, available at <http://www.ofcm.noaa.gov/ICVAAS/Proceedings2004/ICVAAS2004-Proceedings.htm>
- Palmadi, E, 2011, Banten dan Tsunami, <http://pertambangan.geologi.blogspot.com/2011/03/banten-dan-tsunami.html>, Diakses tanggal 10 Juli 2012.
- PVMBG, 2007, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, <http://portal.vsi.esdm.go.id> dan <http://www.desdm.go.id>, Diakses pada tanggal 20 November 2012.
- USGS, 2001, *This Dynamic Earth: The Story of Plate Tectonics*, online edition.
- Watt, S. F. L, Mather, T. A., Pyle, D. M, 2007, *Vulcanian Explosion Cycles: Patterns and Predictability*, Geology 35/9, p. 839-842, doi: 10.1130/G23562A.1.
- Wickman, F. E, 1966, Repose Period Patterns of Volcanoes,I: Volcanic Eruption Regarded as Random Phenomena, Arkiv For Mineralogi och Geologi 4, p. 291-301.
- Wickman, F. E, 1966, Repose Period Patterns of Volcanoes,II:Eruption Histories of Some East Indian Volcanoes, Ibid 4, p. 303-317.
- Wickman, F. E, 1966, Repose Period Patterns of Volcanoes,III:Eruption Histories of Some Japanese Volcanoes, Ibid 4, p. 319-335.
- Wickman, F. E, 1966, Repose Period Patterns of Volcanoes,IV:Eruption Histories of Some Selected Volcanoes, Ibid 4, p. 337-350.
- Wickman, F. E, 1966, Repose Period Patterns of Volcanoes,V:General Discussion and a Tentative Stochastic Model, Ibid 4, p. 351-367.
- Yokoyama, I., 1956, *Energetics in Active Volcanoes*, Earthquake Research Institute.