

TUGAS AKHIR - KA 184801

**PEMETAAN DAERAH RISIKO BENCANA DI INDONESIA  
BERDASARKAN ANALISIS *FREQUENCY-MAGNITUDE*  
GEMPA BUMI MENGGUNAKAN BAYESIAN *GUTENBERG-  
RITCHER MODEL***

**SALSABILLA DINARI**

NRP 06311840000054

Dosen Pembimbing

**Imam Safawi, S.Si, M.Si**

NIP 19810224 201404 1 001

**Pratnya Paramitha O, S.Si, M.Si**

NIP 1990201812015

**PROGRAM STUDI SARJANA SAINS AKTUARIA**

DEPARTEMEN AKTUARIA

FAKULTAS SAINS DAN ANALITIKA DATA

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2022



**TUGAS AKHIR - KA 184801**

**PEMETAAN DAERAH RISIKO BENCANA DI INDONESIA  
BERDASARKAN ANALISIS *FREQUENCY-MAGNITUDE*  
GEMPA BUMI MENGGUNAKAN BAYESIAN *GUTENBERG-  
RITCHER MODEL***

**SALSABILLA DINARI**

**NRP 06311840000054**

Dosen Pembimbing

**Imam Safawi, S.Si, M.Si**

**NIP 19810224 201404 1 001**

**Pratnya Paramitha O, S.Si, M.Si**

**NIP 1990201812015**

**PROGRAM STUDI SARJANA SAINS AKTUARIA**

**DEPARTEMEN AKTUARIA**

**FAKULTAS SAINS DAN ANALITIKA DATA**

**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**

**SURABAYA**

**2022**



FINAL PROJECT - KA 184801

**MAPPING OF DISASTER RISK AREA IN INDONESIA  
BASED ON EARTHQUAKE *FREQUENCY-MAGNITUDE*  
ANALYSIS USING *BAYESIAN GUTENBERG-RITCHER*  
*MODEL***

**SALSABILLA DINARI**

NRP 06311840000054

Advisor

**Imam Safawi, S.Si, M.Si**

NIP 19810224 201404 1 001

**Pratnya Paramitha O, S.Si, M.Si**

NIP 1990201812015

**STUDY PROGRAM ACTUARIAL SCIENCE**

DEPARTMENT OF ACTUARIAL

FACULTY OF SCIENCE AND DATA ANALYTICS

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2022

## LEMBAR PENGESAHAN

### PEMETAAN DAERAH RISIKO BENCANA DI INDONESIA BERDASARKAN ANALISIS *FREQUENCY-MAGNITUDE* GEMPA BUMI MENGGUNAKAN *BAYESIAN GUTENBERG-RITCHER MODEL*

#### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh gelar Sarjana Ilmu Aktuaria pada  
Program Studi Sarjana Sains Aktuaria  
Departemen Aktuaria  
Fakultas Sains dan Analitika Data  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **SALSABILLA DINARI**

NRP. 063118 4000 0054

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- |   |               |                                 |
|---|---------------|---------------------------------|
| 1. Imam Safawi Ahmad, S.Si., M.Si.          | Pembimbing    | ( <i>Imam Safawi Ahmad</i> )    |
| 2. Pratnya Paramitha O., S.Si., M.Si.       | Ko-Pembimbing | ( <i>Pratnya Paramitha O.</i> ) |
| 3. Galuh Oktavia S., S.Si., M.Si., M.Act.Sc | Penguji       | ( <i>Galuh Oktavia S.</i> )     |
| 4. Dr. Drs. Sochardjoepri, M.Si             | Penguji       | ( <i>Sochardjoepri</i> )        |

SURABAYA

Juli, 2022

**APPROVAL SHEET**

**MAPPING OF DISASTER RISK AREA IN INDONESIA BASED ON EARTHQUAKE  
FREQUENCY-MAGNITUDE ANALYSIS USING BAYESIAN GUTENBURG-RITCHER  
MODEL**

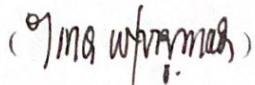
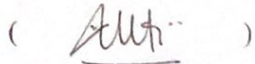
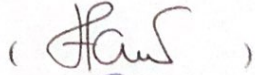

**FINAL PROJECT**

Submitted to fulfill one of the requirements  
for obtaining a degree Bachelor of Actuarial Science at  
Undergraduate Study Program of Actuarial Science  
Department of Actuarial Science  
Faculty of Science and Data Analytics  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By: **SALSABILLA DINARI**

NRP. 063118 4000 0054

Approved by Final Project Examiner Team:

- |   |             |   |
|---|-------------|---|
| 1. Imam Safawi Ahmad, S.Si., M.Si.          | Advisor     | (  ) |
| 2. Pratnya Paramitha O., S.Si., M.Si.       | Co- Advisor | (  ) |
| 3. Galuh Oktavia S., S.Si., M.Si., M.Act.Sc | Examiner    | (  ) |
| 4. Dr. Drs. Sochardjoepri, Msi              | Examiner    | (  ) |

**SURABAYA**

**July, 2022**



## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Salsabilla Dinari / 063118 4000 0054

Departemen : Aktuaria FSAD - ITS

Dosen Pembimbing / NIP: Imam Safawi Ahmad, S.Si, M.Si / 19810224 201404 1 001  
Pratnya Paramitha O., S.Si, M.Si / 1990201812015

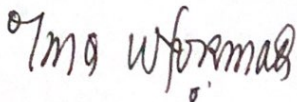
dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Pemetaan Daerah Risiko Bencana di Indonesia berdasarkan Analisis *Frequency-Magnitude* Gempa Bumi menggunakan *Bayesian Gutenberg-Richter Model*" adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, Juli 2022

Mengetahui  
Dosen Pembimbing,

Mahasiswa,

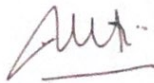


(Imam Safawi Ahmad, S.Si, M.Si)  
NIP. 19810224 201404 1 001



(Salsabilla Dinari)  
NRP. 063118 4000 054

Dosen Ko-Pembimbing,



(Pratnya Paramitha O., S.Si, M.Si)  
NIP. 1990201812015

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Salsabilla Dinari / 063118 4000 0054

Department : Aktuarial FSAD - ITS

Advisor / NIP : Imam Safawi Ahmad, S.Si, M.Si / 19810224 201404 1 001  
Pratnya Paramitha O., S.Si, M.Si / 1990201812015

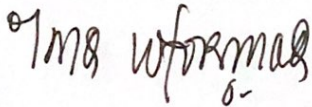
hereby declare that the Final Project with the title of "Mapping of Disaster Risk Area in Indonesia Based on Earthquake *Frequency-Magnitude* Analysis Using *Bayesian Gutenberg-Richter Model*" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, July 2022

Acknowledged  
Advisor,

Student,

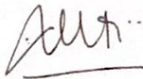


(Imam Safawi Ahmad, S.Si, M.Si)  
NIP. 19810224 201404 1 001



(Salsabilla Dinari)  
NRP. 063118 4000 0054

Co-Advisor,



(Pratnya Paramitha O., S.Si, M.Si)  
NIP. 1990201812015

**PEMETAAN DAERAH RISIKO BENCANA DI INDONESIA BERDASARKAN  
ANALISIS *FREQUENCY-MAGNITUDE* GEMPA BUMI MENGGUNAKAN  
*BAYESIAN GUTENBERG-RITCHER MODEL***

**Nama Mahasiswa / NRP** : Salsabilla Dinari / 063118 4000 0054  
**Departemen** : Aktuaria FSAD - ITS  
**Dosen Pembimbing** : Imam Safawi Ahmad, S.Si., M.Si.  
Pratnya Paramitha Oktaviana, S.Si, M.Si

**Abstrak**

Indonesia merupakan salah satu negara kepulauan yang memiliki keindahan dan keberagaman alam yang tersebar di seluruh wilayahnya seperti. Namun, risiko ancaman bencana alam yang tergolong tinggi membuat masyarakat menjadi khawatir. Salah satu bencana alam yang sering terjadi di Indonesia adalah gempa bumi. Gempa bumi membuat masyarakat mengalami rasa kehilangan yang sangat mendalam seperti kehilangan harta benda atau korban jiwa. Berdasarkan hasil kajian risiko bencana Indonesia yang disusun oleh Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) pada Tahun 2015, jumlah korban jiwa yang disebabkan akibat bencana gempa bumi yaitu sebanyak 86,247,258 jiwa dan kerugian material sebesar 466,689,834 juta mencakup seluruh wilayah di Indonesia pada tahun tersebut. Penanggulangan bencana sangat diperlukan di Indonesia agar dapat mengantisipasi dampak yang diakibatkan oleh bencana gempa bumi. Berdasarkan permasalahan tersebut, akan dilakukan penelitian yang dapat membantu dalam memperkirakan kemungkinan gempa bumi akan terjadi kembali dan melihat daerah mana saja yang memiliki risiko gempa bumi di Indonesia. Data yang digunakan untuk penelitian ini pada periode 2008-2022 yang didapat dari laman *website* Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah membandingkan antara *Gutenberg-Richter* dan *Gutenberg-Ritcher* berbasis *Bayesian*. *Gutenberg-Richter Model* adalah metode untuk menentukan hubungan frekuensi magnitudo dalam melakukan analisis risiko gempa. *Bayesian* adalah algoritma klasifikasi statistik dimana berfungsi untuk melakukan prediksi secara probabilitas pada anggota suatu peristiwa. Proses pemodelan *Gutenberg-Ritcher* berbasis *Bayesian* adalah berdasarkan hasil estimasi parameter *Gutenberg-Ritcher*. Hasil analisis data berdasarkan 39 grid wilayah penelitian bahwa metode Bayesian lebih baik berdasarkan *Akaike Information Criterion (AIC)* yang memiliki nilai relatif lebih kecil. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa Bali, Nusa Tenggara Barat, dan sekitarnya termasuk rawan terjadinya bencana gempa bumi. Kemungkinan risiko kejadian gempa bumi di Indonesia menghasilkan penjelasan bahwa seluruh wilayah penelitian memiliki kemungkinan terjadi gempa bumi dalam rentang waktu 1, 5, 10, dan 20 yang cukup tinggi. Perhitungan periode ulang gempa bumi diketahui daerah yang memiliki periode tersingkat untuk gempa bumi dengan magnitudo tertentu pada wilayah Bali, Nusa Tenggara Barat dan sekitarnya akan terjadi kembali dalam kurun waktu 0,012 tahun (sekitar 4 hari). Gempa bumi dengan periode ulang terlama yaitu pada wilayah Papua akan terjadi kembali dalam kurun waktu 10,5 tahun (sekitar 3832 hari) setelah hari kejadian gempa bumi.

**Kata Kunci** : *Risiko, Gempa Bumi, Frequency-Magnitude, Bayesian, Gutenberg-Richter*



# **MAPPING OF DISASTER RISK AREA IN INDONESIA BASED ON EARTHQUAKE FREQUENCY-MAGNITUDE ANALYSIS USING BAYESIAN GUTENBURG-RITCHER MODEL**

**Student Name / NRP : Salsabilla Dinari / 063118 4000 0054**  
**Department : Aktuarial FSAD - ITS**  
**Advisor : Imam Safawi Ahmad, S.Si., M.Si.**  
**Pratnya Paramitha Oktaviana, S.Si, M.Si**

## **Abstact**

Indonesia is one of the archipelagic countries that has natural beauty and diversity spread throughout its territory such as. However, the relatively high threat of natural disasters makes people worried. One of the natural disasters that often occurs in Indonesia is an earthquake. Earthquakes make people experience a very deep sense of loss such as loss of property or loss of life. The results are based on a study on Indonesian disasters compiled by the National Disaster Management Agency (BNPB) in 2015, the number of fatalities caused by the earthquake was 86,247,258 people and material losses of 466,689,834 million covering areas in Indonesia in 2015. the. Disaster management is urgently needed in Indonesia in order to anticipate the impacts caused by earthquakes. Based on these problems, research will be carried out that can assist in estimating the possibility of an earthquake to occur again and see which areas have an earthquake risk in Indonesia. The data used for this research in the period 2008-2022 were obtained from the website of the Meteorology, Climatology and Geophysics Agency (BMKG). The method used in this study is to compare the Gutenberg-Richter and the Bayesian-based Gutenberg-Richter. The Gutenberg-Richter Model is a method for determining the frequency-magnitude relationship in conducting an earthquake risk analysis. Bayesian is a statistical classification which works to predict probability on an event. The Bayesian-based Gutenberg-Richter modeling process is based on the estimation results of the Gutenberg-Richter parameters. The results of data analysis based on 39 grids of the research area that the Bayesian method is better based on the Akaike Information Criterion (AIC) which has a relatively smaller value. This research also shows that Bali, West Nusa Tenggara, and its surroundings are prone to earthquake disasters. Directing the risk of earthquakes in Indonesia results in an explanation that the entire research area has a fairly high probability of an earthquake occurring in the 1, 5, 10, and 20 timeframes. Calculation of the return period for earthquakes is known to have the shortest period for an earthquake with a certain scale in the Bali, West Nusa Tenggara and surrounding areas will occur again within a period of 0.012 years (about 4 days). The earthquake with the longest return period, namely in the Papua region, will occur again within 10.5 years (about 3832 days) after the earthquake.

**Keywords: Risk, Earthquake, Frequency-Magnitude, Bayesian, Gutenberg-Richter**

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan atas rahmat dan hidayah yang diberikan Allah SWT sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul “Pemetaan Daerah Risiko Bencana di Indonesia berdasarkan Analisis *Frequency- Magnitude* Gempa Bumi menggunakan *Bayesian Gutenberg-Richter Model*”. Tujuan dari penulisan laporan tugas akhir penelitian ini sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada program studi Sains Aktuaria, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Tugas Akhir ini dapat terselesaikan tidak lepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, atas dukungan, saran, motivasi, semangat, serta bantuan yang telah diberikan kepada penulis, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat, kemudahan dan kelancaran sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Orang tua serta keluarga atas segala doa, motivasi, bimbingan, dan dukungan yang telah diberikan kepada penulis.
3. Bapak Dr. Drs. Soehardjoepri selaku Kepala Departemen Sains Aktuaria dan juga penguji yang telah memberikan fasilitas, sarana, prasarana, bimbingan dan pesan moral selama proses pengerjaan skripsi.
4. Bapak Imam Safawi Ahmad, S.Si, M.Si dan Ibu Pratnya Paramitha Oktaviana, S.Si, M.Si selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah meluangkan waktu dan memberikan bimbingan, saran, dukungan, serta motivasi selama penyusunan Tugas Akhir.
5. Ibu Galuh Oktavia Siswono S.Si, M.Si, M.Act.Sc selaku dosen penguji yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama proses pengerjaan skripsi.
6. Jacyntha Diva, Hanifah Rizqy, Nadia Inka Aulia, dan Safira Dwiyantri yang selalu memberikan saran, dukungan, bantuan dan diskusi terkait skripsi .
7. Teman-teman Aktuaria ITS Angkatan 2018 (ARKAGANA) dan semua pihak yang turut membantu dalam pengerjaan tugas akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Besar harapan penulis untuk mendapatkan kritik dan saran yang dapat membangun, sehingga Tugas Akhir ini dapat disempurnakan lagi, karena penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki banyak kekurangan. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pembaca.

Surabaya, Juli 2022

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>APPROVAL SHEET</b> .....	iv
<b>PERNYATAAN ORISINALITAS</b> .....	v
<b>STATEMENT OF ORIGINALITY</b> .....	vi
<b>Abstrak</b> .....	vii
<b>Abstact</b> .....	viii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xv
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
2.1 Penelitian Terdahulu .....	5
2.2 Bencana Gempa Bumi .....	6
2.2.1 Pengertian Gempa Bumi .....	6
2.2.2 Jenis Gempa Bumi .....	7
2.3 Magnitudo Gempa Bumi .....	7
2.4 Gempa Bumi di Indonesia .....	8
2.5 Manajemen Risiko .....	9
2.6 Statistika Deskriptif .....	9
2.7 <i>Gutenberg-Ritcher</i> .....	9
2.8 Analisis <i>Gutenberg-Ritcher</i> berbasis <i>Bayesian</i> .....	12
2.9 <i>Bayesian Network Inference</i> .....	13
2.10 <i>Akaike Information Criterion (AIC)</i> .....	14
2.11 Pemetaan .....	14
<b>BAB III METODOLOGI</b> .....	17
3.1 Sumber Data .....	17

3.2	Variabel Penelitian .....	17
3.3	Pembagian Grid.....	18
3.4	Metode Analisis.....	19
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>21</b>
4.1	Pemetaan Wilayah Indonesia .....	21
4.2	Karakteristik Data Gempa Bumi .....	21
4.2.1	Karakteristik Data Keseluruhan Gempa Bumi.....	21
4.2.2	Karakteristik Data Tiap Wilayah Penelitian .....	25
4.3	Menghitung Nilai Parameter <i>Gutenberg-Ritcher</i> .....	37
4.4	Menghitung Nilai Parameter <i>Bayesian</i> .....	40
4.5	Pemilihan Model Terbaik.....	46
4.6	Pemetaan Daerah Risiko Bencana.....	50
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>55</b>
5.1	Kesimpulan .....	55
5.2	Saran.....	55
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>57</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>59</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>		<b>86</b>



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Kawasan yang Rawan Terjadi Gempa Bumi di Indonesia (Sumber : Katalog PuSGen, 2016).....	8
<b>Gambar 2.2</b> Spesifikasi Ikon pada DAG (Sumber: Oktaviana dan Fithriasari 2017).....	14
<b>Gambar 3.1</b> Visualisasi Pembagian Wilayah Penelitian .....	18
<b>Gambar 3.2</b> Diagram Alir Penelitian .....	19
<b>Gambar 3.3</b> Diagram Alir Penelitian (Lanjutan) .....	20
<b>Gambar 4.1</b> Gambar Peta Indonesia .....	22
<b>Gambar 4.2</b> Histogram Data Magnitudo Gempa Bumi di Indonesia.....	23
<b>Gambar 4.3</b> Boxplot Karakteristik Data Magnitudo Gempa Bumi .....	24
<b>Gambar 4.4</b> Histogram Frekuensi Kejadian Wilayah Indonesia.....	25
<b>Gambar 4.5</b> Wilayah Papua Barat.....	26
<b>Gambar 4.6</b> Wilayah Papua .....	26
<b>Gambar 4.7</b> Wilayah Sulawesi Tengah.....	27
<b>Gambar 4.8</b> Wilayah Bengkulu, sebagian wilayah Lampung dan Sumatera Selatan .....	27
<b>Gambar 4.9</b> Wilayah Nusa Tenggara Timur.....	27
<b>Gambar 4.10</b> Wilayah Papua .....	28
<b>Gambar 4.11</b> Wilayah Riau.....	28
<b>Gambar 4.12</b> Wilayah Kalimantan Selatan dan Sulawesi Barat .....	29
<b>Gambar 4.13</b> Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 5.....	29
<b>Gambar 4.14</b> Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 1.....	30
<b>Gambar 4.15</b> Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 3.....	31
<b>Gambar 4.16</b> Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 7.....	31
<b>Gambar 4.17</b> Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 11.....	32
<b>Gambar 4.18</b> Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 13.....	33
<b>Gambar 4.19</b> Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 13.....	33
<b>Gambar 4.20</b> Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 12.....	34
<b>Gambar 4.21</b> Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 15.....	34
<b>Gambar 4.22</b> Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 15.....	35
<b>Gambar 4.23</b> Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 17.....	36
<b>Gambar 4.24</b> Doodle Parameter Bayesian .....	40
<b>Gambar 4.25</b> Time Series Plot dari Parameter a dan b dalam Grid 5 .....	41
<b>Gambar 4.26</b> Time Series Plot dari Parameter a dan b dalam Grid 35 .....	41
<b>Gambar 4.27</b> Grafik Gelman-Rubin dari Parameter a dan b di Grid 5 .....	42
<b>Gambar 4.28</b> Grafik Gelman-Rubin dari Parameter a dan b di Grid 35 .....	42
<b>Gambar 4.29</b> Distribusi Normal dari Parameter a dan b di Grid 5 .....	42
<b>Gambar 4.30</b> Distribusi Normal dari Parameter a dan b di Grid 35 .....	42

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Penelitian Terdahulu .....	5
<b>Tabel 3.1</b> Variabel Penelitian .....	17
<b>Tabel 3.2</b> Struktur Data Awal .....	17
<b>Tabel 3.3</b> Struktur Data Akhir .....	17
<b>Tabel 3.4</b> Pembagian Wilayah Penelitian .....	18
<b>Tabel 4.1</b> Wilayah yang Terdapat Dalam 39 Grid Penelitian .....	21
<b>Tabel 4.2</b> Karakteristik Deskriptif Data Magnitudo Gempa Bumi di Indonesia .....	23
<b>Tabel 4.3</b> Karakteristik Data Magnitudo Gempa berdasarkan per Grid Wilayah Penelitian...	25
<b>Tabel 4.4</b> Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 5 .....	29
<b>Tabel 4.5</b> Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 1 .....	30
<b>Tabel 4.6</b> Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 3 .....	31
<b>Tabel 4.7</b> Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 7 .....	31
<b>Tabel 4.8</b> Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 11 .....	32
<b>Tabel 4.9</b> Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 11 .....	33
<b>Tabel 4.10</b> Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 13 .....	34
<b>Tabel 4.11</b> Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 12 .....	34
<b>Tabel 4.12</b> Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 15 .....	35
<b>Tabel 4.13</b> Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 16 .....	35
<b>Tabel 4.14</b> Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 17 .....	36
<b>Tabel 4.15</b> Hasil dari Estimasi Parameter Magnitudo .....	37
<b>Tabel 4.16</b> Hasil Pemodelan Gutenberg-Ritcher .....	38
<b>Tabel 4.17</b> Perhitungan Frekuensi Gempa Bumi dengan $M_0$ dan $M$ Gutenberg-Ritcher .....	39
<b>Tabel 4.18</b> Hasil Estimasi Parameter Bayesian .....	43
<b>Tabel 4.19</b> Hasil Pemodelan Bayesian .....	44
<b>Tabel 4.20</b> Perhitungan Frekuensi Gempa Bumi dengan $M_{max}$ dan $M$ Bayesian .....	45
<b>Tabel 4.21</b> Perbandingan Nilai Parameter dari Gutenberg-Ritcher dan Bayesian .....	46
<b>Tabel 4.22</b> Perbandingan Hasil AIC Model Gutenberg-Ritcher dan Bayesian .....	49
<b>Tabel 4.23</b> Jumlah Rata-Rata Tahunan Gempa Bumi .....	50
<b>Tabel 4.24</b> Risiko Terjadinya Gempa Bumi .....	51
<b>Tabel 4.25</b> Periode Ulang Gempa Bumi .....	52
<b>Tabel 4.26</b> Pemetaan Daerah Risiko Gempa Bumi di Indonesia .....	52

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran 1.</b> Data Gempa Bumi .....	59
<b>Lampiran 2.</b> Struktur Data Akhir per Grid Wilayah Penelitian .....	60
<b>Lampiran 3.</b> Histogram Frekuensi per Grid Wilayah Penelitian .....	71
<b>Lampiran 4.</b> Hasil Output Pemodelan Regresi .....	76
<b>Lampiran 5.</b> Time Series dari History Chain Parameter Bayesian .....	78
<b>Lampiran 6.</b> Statistik Gelman-Rubin dari Parameter Bayesian .....	79
<b>Lampiran 7.</b> Distribusi Parameter Bayesian .....	80
<b>Lampiran 8.</b> Syntax Penentuan Maps Indonesia.....	81
<b>Lampiran 9.</b> Syntax Pemodelan dan Pemilihan Model Terbaik .....	84
<b>Lampiran 10.</b> Syntax Pemodelan Bayesian .....	85

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara kepulauan yang memiliki keindahan dan keberagaman alam yang tersebar di seluruh wilayahnya seperti hamparan laut dan pegunungan. Namun, risiko ancaman bencana di wilayah tersebut masih tergolong tinggi membuat masyarakat menjadi khawatir. Menurut Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana, bencana merupakan peristiwa atau rangkaian peristiwa yang mengancam dan mengganggu kehidupan dan penghidupan masyarakat yang disebabkan, baik oleh faktor alam dan/atau faktor nonalam maupun faktor manusia sehingga mengakibatkan timbulnya korban jiwa manusia, kerusakan lingkungan, kerugian harta benda, dan dampak psikologis.

Bencana dapat terjadi dimanapun dan kapanpun baik di daratan maupun lautan. Kondisi dan letak geografis Indonesia yang juga salah satu faktor terjadinya bencana alam. Secara geografis Indonesia merupakan negara kepulauan yang terletak pada pertemuan empat lempeng tektonik lempeng Benua Asia, Benua Australia, lempeng Samudera Hindia dan Samudera Pasifik. Pada bagian selatan dan timur Indonesia terdapat gunungapi (*volcanic arc*) yang memanjang dari Pulau Sumatera, Jawa, Nusa Tenggara, hingga Sulawesi. Untuk sisinya berupa pegunungan vulkanik tua dan dataran rendah yang sebagian didominasi oleh rawa-rawa. Sehingga kondisi tersebut membuat Indonesia berpotensi terjadinya bencana alam seperti letusan gunung berapi, gempa bumi, tsunami, banjir, dan tanah longsor (KPUPR, 2019).

Menurut Laporan Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) tahun 2016, kejadian bencana dibagi menjadi 2 kelompok yaitu kelompok hidrometeorologi yang berupa kejadian bencana banjir, gelombang ekstrim, kebakaran lahan dan hutan, kekeringan, dan cuaca ekstrim serta kelompok bencana geologi yang meliputi gempa bumi, tsunami, letusan gunung berapi, dan tanah longsor. Meskipun jumlah kejadian bencana yang disebabkan faktor geologi tidak terlalu signifikan dibanding faktor hidrometeorologis, kejadian bencana oleh faktor geologis salah satunya gempa bumi dapat menimbulkan kerugian cukup besar dari korban maupun kerugian material dan. Berdasarkan hasil kajian risiko bencana Indonesia yang disusun oleh BNPB pada Tahun 2015, jumlah korban jiwa yang disebabkan akibat bencana gempa bumi yaitu sebanyak 86,247,258 jiwa dan kerugian material sebesar Rp. 466,689,834 juta mencakup seluruh wilayah di Indonesia pada tahun tersebut.

Tekanan yang diakibatkan pergerakan dari empat lempeng besar bumi tersebut menyebabkan interior lempeng bumi terpecah-pecah menjadi bagian-bagian kecil kerak bumi yang bergerak antara satu terhadap lainnya. Karena itu, Indonesia berada pada kawasan yang mempunyai aktivitas gempa bumi yang cukup tinggi mengakibatkan sering terjadinya bencana alam gempa bumi (Pasau & Tanauma, 2011). Selain tingginya aktivitas gempa bumi, magnitudo atau kekuatan gempa juga berpengaruh dalam terjadinya gempa bumi dengan rentang 1.00 – 9.50 dalam satuan skala *Ritcher*. Contoh gempa besar yang terjadi di Indonesia yaitu Aceh-Andaman yang diikuti tsunami sebesar 9.2 pada tahun 2004, Nias-Simeulue sebesar 8.7 pada tahun 2005, Yogyakarta yang diikuti tsunami sebesar 7.6 pada tahun 2006, dan Bengkulu tahun 2007 sebesar 8.4 (BNPB, 2016). Oleh karena itu, pemerintah memiliki peranan penting untuk mengurangi risiko bencana alam gempa bumi. Pemerintah perlu melakukan pencegahan bagi daerah yang memiliki risiko tinggi. Dengan adanya permasalahan tersebut, diperlukan analisis yang diharapkan dapat membantu pemerintahan dalam memberikan edukasi pencegahan kepada masyarakat yang mungkin nantinya akan terdampak gempa bumi.

Penelitian terdahulu mengenai gempa bumi di Indonesia, antara lain Homer dkk. (2013) menganalisis Distribusi Frekuensi-Magnitudo Gempa bumi Wilayah Sulawesi Utara. Analisis Distribusi Frekuensi-Magnitudo Gempa Bumi menggunakan metode *maximum likelihood*

sebagai upaya mitigasi dalam menentukan nilai parameter gempa (nilai  $a-b$ ), perulangan gempa merusak, serta daerah berpotensi gempa merusak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada timur (dalam arah utara-selatan) mempunyai nilai  $a-b$  yang lebih rendah dibandingkan barat wilayah Sulawesi Utara dengan nilai masing-masing sekitar 7-7,8 dan 0,8-1,5. Hasil perhitungan perulangan gempa merusak (Magnitudo  $M_w = 7$ ) sekitar 15-20 tahun dengan daerah berpotensi gempa merusak adalah Kabupaten Kepulauan Sangihe, Kabupaten Kepulauan Sitaro, kota Bitung (terutama kecamatan Lembah Utara dan Selatan).

Pada penelitian selanjutnya oleh Oktaviana dan Irhamah (2021) melakukan penelitian mengenai Identifikasi Distribusi Jumlah Gempa Bumi dan Kerugian Akibat Gempa Bumi di Indonesia dengan menggunakan metode *Kolmogorov-Smirnov Goodness-of-Fit test*. Hasil dari identifikasi dengan kurun waktu 40 tahun didapatkan bahwa gempa bumi yang memiliki kekuatan 5 skala Richter sering terjadi pada tahun 2004 serta pada tahun tersebut terjadi gempa Aceh yang memiliki kekuatan sebesar 9.1 skala Richter menyebabkan kerugian tertinggi yaitu sekitar 14785,500 miliar rupiah. Pada hasil uji variabel yang digunakan menghasilkan bahwa jumlah gempa dan kerugian akibat gempa bumi tidak berdistribusi normal. Dalam hasil *Kolmogorov-Smirnov Goodness-of-Fit test* untuk jumlah gempa mengikuti distribusi gamma sedangkan untuk kerugian akibat gempa bumi mengikuti distribusi fungsi power.

Penelitian mengenai *Gutenberg-Richter Model* pada gempa bumi pernah dilakukan oleh Kara (2017) menganalisis risiko gempa bumi di Turki menggunakan *Copula Models*. Analisis risiko gempa bumi yang ada di Turki berdasarkan *Copula Models* yang dapat menjadi alternatif untuk model *Gutenberg-Richter* dalam jangka waktu antara 1900-2014 tahun dengan magnitudo  $4.0 \leq M \leq 7.9$ . Hasil dari ketiga *Copula Models* yang lebih cocok dengan data yaitu student's t dengan nilai *Akaike Information Criterion* (AIC) terkecil diantara gaussian dan frank. *Copula Models* ini dapat diusulkan sebagai alternatif untuk menentukan hubungan magnitudo dan frekuensi karena memberikan estimasi periode pengulangan yang lebih realistis sedangkan untuk peluang terjadinya gempa tidak jauh berbeda.

Dalam penelitian selanjutnya yang dibuat oleh Kara dan Durukan (2017), menjelaskan dalam penelitiannya menganalisis statistik bahaya gempa bumi di Turki menggunakan *Generalized Linear Models* sebagai alternatif dari model *Gutenberg-Richter* dengan menggunakan hubungan antara magnitudo dan frekuensi gempa bumi. *Generalized Linear Models* dibagi menjadi 2 yaitu *Generalized Poisson Regression Models* dan *Generalized Negative Binomial Regression Models* yang menghasilkan nilai AIC sebesar 101.956 dan 145.918 serta nilai AIC *Gutenberg-Richter* sebesar 111.497. Hubungan magnitudo-frekuensi di Turki dijelaskan lebih baik dengan model GPR karena menghasilkan nilai AIC yang relatif kecil dibandingkan GR dan GNBR. Untuk nilai periode ulang yang di hasilkan dari ketiga model bahwa model GPR menghasilkan nilai periode ulang lebih kecil dibanding yang lain untuk gempa berkekuatan tinggi. Disimpulkan dari hasil yang diperoleh bahwa model GPR dapat memperkirakan waktu sebelum terjadinya gempa dengan kekuatan tinggi.

Penelitian lainnya mengenai *Bayesian* pada gempa bumi dilakukan oleh Morales dkk (2019), yang menerapkan metode statistik *Bayesian* untuk memperkirakan distribusi magnitudo gempa bumi yang terjadi di Italia tengah dua periode waktu yang berbeda. Metode pengambilan sampel yang digunakan adalah *Monte Carlo*. Metode inferensi *Bayesian* dalam penelitian ini dapat dengan tepat mereproduksi distribusi probabilitas magnitudo gempa bumi yang terjadi di Italia tengah dari tahun 1995 hingga 2018.

Berdasarkan permasalahan dan uraian terdahulu yang telah dijelaskan tersebut, akan dilakukan penelitian yang bertujuan memperkirakan kemungkinan gempa bumi terjadi kembali dan daerah dimana terjadi gempa bumi di Indonesia. Periode data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data dari tahun 2008 sampai 2022. Dari data tersebut akan dianalisis dengan membandingkan 2 metode antara *Gutenberg-Richter* dan *Gutenberg-Richter* berbasis



*Bayesian*. Proses pemodelan *Gutenberg-Richter* berbasis *Bayesian* adalah berdasarkan hasil estimasi parameter *Gutenberg-Richter*. Penelitian ini di harapkan dapat menghasilkan parameter risiko gempa bumi yang dapat digunakan untuk pemetaan daerah risiko bencana.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan pada latar belakang, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pemodelan hubungan Magnitudo-Frekuensi Gempa bumi di Indonesia dengan menggunakan metode *Gutenberg-Richter Model* dan *Bayesian*?
2. Bagaimana model terbaik dari model hubungan Magnitudo-Frekuensi Gempa bumi di Indonesia berdasarkan metode *Gutenberg-Richter Model* dan *Bayesian*?
3. Bagaimana hasil pemetaan daerah risiko rawan bencana gempa bumi?

## **1.3 Batasan Masalah**

Batasan dalam penelitian ini meliputi data gempa bumi di Indonesia dalam periode tahun 2008 sampai 2022. Dengan batas wilayah penelitian yaitu batas Indonesia pada  $6^{\circ}$  LU -  $11^{\circ}$  LS dan  $95^{\circ}$  BT -  $141^{\circ}$  BT.

## **1.4 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan permasalahan yang dirumuskan, tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Mengetahui pemodelan hubungan Magnitudo-Frekuensi Gempa bumi di Indonesia dengan menggunakan metode *Gutenberg-Richter Model* dan *Bayesian*.
2. Mengetahui model terbaik dari model hubungan Magnitudo-Frekuensi Gempa bumi di Indonesia berdasarkan metode *Gutenberg-Richter Model* dan *Bayesian*.
3. Mengetahui daerah di Indonesia yang memiliki risiko bencana gempa bumi

## **1.5 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Menjadi alternatif dalam menentukan hubungan Magnitudo-Frekuensi selain metode *Gutenberg-Richter*.
2. Mengetahui kemungkinan gempa bumi tersebut akan terjadi kembali di kemudian hari.
3. Sebagai referensi pemerintah dalam pengambilan keputusan atau kebijakan yang dapat dimaksimalkan guna mengurangi risiko gempa bumi di Indonesia.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam sub bab ini akan dibahas mengenai penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Bahan kajian utama yang dibahas adalah mengenai kejadian gempa bumi di beberapa wilayah di Dunia. Tabel 2.1 merupakan jurnal dan penelitian yang di jadikan referensi dalam penulisan.

**Tabel 2.1** Penelitian Terdahulu

No.	Penulis	Tahun	Judul	Metode	Hasil
1.	Homer dkk.	2013	Analisis Distribusi Frekuensi-Magnitudo Gempabumi Wilayah Sulawesi Utara	<i>Maximum Likelihood</i>	Menunjukkan bahwa pada timur mempunyai nilai $\alpha$ - $\beta$ yang lebih rendah dibandingkan barat wilayah Sulawesi Utara dengan nilai masing-masing sekitar 7-7,8 dan 0,8-1,5. Hasil perhitungan perulangan gempa merusak sekitar 15-20 tahun dengan daerah berpotensi gempa merusak adalah Kabupaten Kepulauan Sangihe, Kabupaten Kepulauan Sitaro, kota Bitung (terutama kecamatan Lembah Utara dan Selatan).
2.	Oktaviana dan Irhamah	2021	<i>Kolmogorov-Smirnov Goodness-of-Fit test</i> for identifying distribution of the number of earthquakes and the losses due to earthquakes in Indonesia	<i>Kolmogorov-Smirnov Goodness-of-Fit test</i>	Gempa bumi yang memiliki kekuatan 5 skala Richter sering terjadi pada tahun 2004 serta pada tahun tersebut terjadi gempa Aceh yang memiliki kekuatan sebesar 9.1 skala Richter menyebabkan kerugian tertinggi yaitu sekitar 14785,500 miliar rupiah. Pada hasil uji variabel yang digunakan menghasilkan bahwa jumlah gempa dan kerugian akibat gempa bumi tidak berdistribusi normal. Untuk jumlah gempa mengikuti distribusi gamma sedangkan untuk kerugian akibat gempa bumi mengikuti distribusi fungsi power.
3.	Kara	2017	The Earthquake Risk Analysis Based on <i>Copula Models</i> for Turkey	<i>Gutenberg-Richter</i> dan <i>Copula Models</i>	Dari ketiga <i>Copula Models</i> yang lebih cocok dengan data yaitu student's t dengan nilai <i>Akaike Information Criterion</i> (AIC) terkecil diantara gaussian dan frank. <i>Copula Models</i> ini dapat diusulkan sebagai alternatif untuk menentukan hubungan magnitudo dan frekuensi karena memberikan estimasi periode pengulangan yang lebih realistis 4

**Tabel 2.1** Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

No.	Penulis	Tahun	Judul	Metode	Hasil
4.	Kara dan Durukan	2017	The Statistical Analysis of the Earthquake Hazard for Turkey by <i>Generalized Linear Models</i>	<i>Gutenberg-Ritcher</i> dan <i>Generalized Linear Models</i>	Hubungan magnitudo-frekuensi di Turki dijelaskan lebih baik dengan model <i>Generalized Poisson Regression Models</i> karena menghasilkan nilai AIC yang relatif kecil dibandingkan <i>Gutenberg-Ritcher</i> dan <i>Generalized Negative Binomial Regression Models</i> . Untuk nilai periode ulang yang di hasilkan dari ketiga model bahwa model GPR menghasilkan nilai periode ulang lebih kecil dibanding yang lain untuk gempa berkeuatan tinggi.
5.	Morales dkk.	2019	<i>Bayesian</i> Analysis of the Magnitude of Earthquakes Located in a Seismic Region on Italy	<i>Bayesian</i>	Metode inferensi Bayesian dalam penelitian ini dapat dengan tepat mereproduksi distribusi probabilitas magnitudo gempa bumi yang terjadi di Italia tengah dari tahun 1995 hingga 2018.

## 2.2 Bencana Gempa Bumi

Bencana alam memang sebuah kejadian yang dapat terjadi kapanpun dan dimanapun di dunia ini. Hampir setiap tahunnya di seluruh belahan bumi terjadi bencana alam salah satunya gempa bumi. Gempa bumi menjadi termasuk salah satu bencana alam yang paling banyak memakan korban jiwa sepanjang sejarah.

### 2.2.1 Pengertian Gempa Bumi

Gempa bumi merupakan gejala alamiah yang berupa gerakan guncangan atau getaran tanah yang ditimbulkan oleh adanya sumber-sumber getaran tanah akibat terjadinya patahan atau sesar akibat aktivitas tektonik, letusan gunungapi akibat aktivitas vulkanik, hantaman benda langit (misalnya meteor dan asteroid), dan/atau ledakan bom akibat ulah manusia. Berdasarkan pengertian Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) penyebab terjadinya gempa bumi yaitu :

- Proses tektonik akibat pergerakan kulit/lempeng bumi.
- Aktivitas sesar di permukaan bumi
- Pergerakan geomorfologi secara lokal, contohnya terjadi runtuh tanah.
- Aktivitas gunung api atau ledakan nuklir (BNPB, 2012).

Salim dan Siswanto (2018) berpendapat bahwa gempa bumi sebagai gejala fisik yang ditandai dengan adanya getaran bumi dengan berbagai kekuatan. Pergerakan tiba-tiba dari lapisan batuan di dalam bumi menghasilkan energi yang dipancarkan ke segala arah berupa gelombang gempa bumi atau gelombang seismik. Ketika gelombang ini mencapai permukaan bumi, getarannya dapat merusak segala sesuatu di permukaan bumi seperti bangunan dan infrastruktur lainnya sehingga dapat menimbulkan korban jiwa dan harta benda (Sunarjo dkk, 2012).



Berdasarkan beberapa definisi sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa gempa bumi merupakan peristiwa terjadinya gejala alam melalui getaran tanah dari beberapa sumber dan kekuatan berbeda-beda yang dapat mengakibatkan kerusakan pada rumah penduduk, infrastruktur, kehilangan harta benda, dan menyebabkan korban jiwa. Berbeda dari bencana lainnya seperti letusan gunung api yang didahului tanda-tanda sebelum kejadian, gempa bumi salah satu bencana yang selalu datang mendadak dan tidak dapat diprediksi kapan terjadinya sehingga menimbulkan kepanikan karena tidak ada yang menduga serta tidak ada yang mempersiapkan diri dalam menanggulangnya.

### 2.2.2 Jenis Gempa Bumi

Menurut Sunarjo dkk (2012) gempa bumi dapat dikelompokkan menjadi beberapa macam yaitu.

#### 1. Berdasarkan Penyebab

Berdasarkan atas penyebab terjadinya gempa bumi diantaranya.

- a. Gempa Tektonik adalah gempa bumi yang disebabkan karena pelepasan energi elastis yang tersimpan dalam lempeng tektonik. Lempeng tektonik sendiri merupakan batuan yang bersifat elastis, sehingga energi yang diterima dari lapisan mantel tersimpan dalam bentuk energi elastis.
- b. Gempa Vulkanik adalah gempa bumi yang disebabkan melalui magma yang berada pada kantong dibawah gunung api mendapat tekanan dan melepas energinya secara tiba-tiba sehingga menimbulkan getaran tanah.
- c. Gempa Runtuhan adalah gempa bumi lokal yang terjadi karena suatu goa di daerah batuan karst atau lokasi pertambangan runtuh.
- d. Gempa jatuhnya meteor disebabkan oleh jatuhnya meteorit atau benda langit ke permukaan bumi.
- e. Gempa Buatan Manusia disebabkan karena aktivitas yang dilakukan manusia seperti peledakan bom, nuklir, atau palu yang dipukulkan ke permukaan bumi.

#### 2. Berdasarkan Kekuatan atau Magnitudo

Dari besarnya kekuatan gempa bumi dengan skala Richter dapat dibedakan atas.

- a. Gempa bumi sangat besar  $M > 8$  SR
- b. Gempa bumi besar  $M 7 - 8$  SR
- c. Gempa bumi merusak  $M 5 - 6$  SR
- d. Gempa bumi sedang  $M 4 - 5$  SR.
- e. Gempa bumi kecil  $M 3 - 4$  SR
- f. Gempa bumi mikro  $M 1 - 3$  SR
- g. Gempa bumi ultra mikro  $M < 1$  SR

#### 3. Berdasarkan Proses Kemunculan dan Kesudahannya

Pada proses kemunculan dan kesudahannya dapat dibedakan atas beberapa jenis, diantaranya.

- a. Gempa bumi utama (*mainshock*) yang langsung diikuti gempa bumi susulan tanpa gempa bumi pendahuluan (*fore shock*)
- b. Gempa bumi sebelum terjadinya gempa bumi utama diawali dengan adanya gempa bumi pendahuluan dan selanjutnya terdapat gempa bumi susulan.
- c. Gempa bumi terus-menerus dan tidak terdapat gempa bumi utama yang signifikan atau dapat disebut gempa bumi *swarm*.

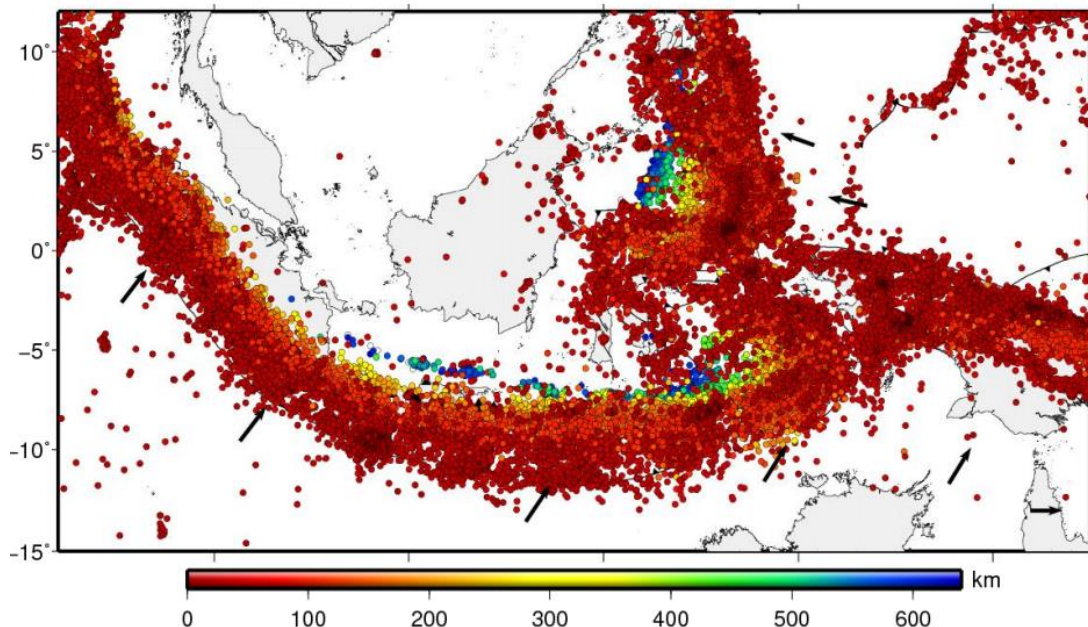
### 2.3 Magnitudo Gempa Bumi

Magnitudo atau bisa disebut kekuatan gempa bumi merupakan suatu besaran yang menyatakan besarnya energi seismik yang dipancarkan oleh sumber gempa. Besaran ini

memiliki nilai yang sama walaupun mengukurnya ditempat yang berbeda. Satuan yang digunakan untuk menyatakan magnitudo gempa bumi secara umum dengan skala *Richter*. Terdapat beberapa definisi magnitudo selain skala *Richter* yang dikenalkan oleh Gutenberg dalam kajian tentang gempa bumi adalah  $M_s$  menggunakan fase gelombang permukaan Rayleigh,  $M_b$  atau *body waves magnitude* diukur berdasarkan amplitudo badan dengan menggunakan gelombang P maupun gelombang S (Alamsyah, 2017). Magnitudo gempa merupakan salah satu aspek penting dalam parameter gempa bumi yang dapat diukur secara langsung. Besarnya kekuatan gempa digunakan untuk mempelajari pola saat terjadinya gempa. Oleh karena itu, gempa dapat ditentukan atau diidentifikasi dari magnitudonya serta jumlah energi yang dilepaskan dapat diukur menggunakan seismograf (Eluyemi dkk, 2019).

## 2.4 Gempa Bumi di Indonesia

Kondisi tektonik Indonesia yang terletak pada pertemuan lempeng besar dan beberapa lempeng kecil, menyebabkan daerah tersebut berpotensi mengalami banyak kejadian gempa. Indonesia dikelilingi oleh 4 lempeng besar yaitu Benua Australia, Benua Asia, Samudera Hindia, dan Samudera Pasifik. Akibat dari proses tektonik, peristiwa gempa sering terjadi di sebagian besar wilayah Indonesia sebagaimana terlihat dalam Gambar 2.1. Sumber gempunya teridentifikasi berada pada zona subduksi aktif dibagian barat hingga timur Indonesia. Sisa energi dari proses tumbukan antar lempeng membuat adanya sesar di daratan atau lautan di beberapa pulau dan laut Indonesia.



**Gambar 2.1** Kawasan yang Rawan Terjadi Gempa Bumi di Indonesia (Sumber : Katalog PuSGen, 2016)

Pada bagian barat Sumatera, proses Bergeraknya suatu lempeng tektonik dengan lempeng yang lain mengakibatkan kejadian gempa dengan nilai magnitudo 8 atau 9, seperti pada wilayah Aceh pada tahun 2004 ( $M_w = 9,2$ ). Menurut National Geographic, gempa di Aceh dinilai sebagai bencana terburuk nomor 2 sepanjang masa karena berdampak pada 14 negara serta mengakibatkan kematian, kehilangan harta benda, dan kerugian ekonomi. Terdapat juga di selatan Jawa, terjadi gempa di Pacitan tahun 1994 dan Pangandaran tahun 2006 ( $M_w = 7,8$ ) telah mengakibatkan gelombang tsunami dengan tinggi mencapai 20 m. Selain itu juga terjadi beberapa gempa merusak dalam beberapa dekade seperti di Yogyakarta tahun 2006 ( $M_w = 6,3$ ), Padang tahun 2009 ( $M_w = 7,6$ ), dan Pidie Jaya di Aceh tahun 2016 ( $M_w = 6,5$ ). Gempa-

gempa yang terjadi dalam beberapa dekade mengakibatkan kehilangan korban jiwa serta kerugian material yang mempengaruhi sektor ekonomi dan pembangunan. Dari penjelasan sebelumnya dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan tingkat magnitudo antara zona subduksi di barat dan di selatan (PusGeN, 2017).

## 2.5 Manajemen Risiko

Khan dkk (2008) berpendapat, manajemen risiko bencana dapat diartikan sebagai kegiatan serta langkah yang diambil sebelum, selama, dan setelah bencana sehingga dapat mengurangi dan memulihkan kerugian. Manajemen risiko bencana adalah pengaturan atau manajemen bencana dengan penekanan pada faktor-faktor yang bertujuan mengurangi risiko saat sebelum terjadinya bencana. Berdasarkan pengertiannya, melakukan manajemen risiko dapat dilakukan dalam bentuk (PPPSDAK, 2017):

- a. Pencegahan bencana adalah serangkaian kegiatan yang dilakukan sebagai upaya untuk menghilangkan dan/atau mengurangi ancaman bencana.
- b. Mitigasi adalah serangkaian upaya untuk mengurangi risiko bencana, baik melalui pembangunan fisik maupun penyadaran dan peningkatan kemampuan menghadapi ancaman bencana.
- c. Kesiapsiagaan adalah serangkaian kegiatan yang dilakukan untuk mengantisipasi bencana melalui pengorganisasian serta melalui langkah yang tepat guna dan berdaya guna. Kesiapsiagaan ini sebenarnya masuk manajemen darurat, namun letaknya di pra bencana. Dalam fase ini juga terdapat peringatan dini yaitu serangkaian kegiatan pemberian peringatan sesegera mungkin kepada masyarakat tentang kemungkinan terjadinya bencana pada suatu tempat oleh lembaga yang berwenang.

## 2.6 Statistika Deskriptif

Pengertian statistika deskriptif menurut Bernstein dkk (1999) yaitu teknik yang berfungsi memproses data numerik mentah menjadi teknik yang berguna serta memberikan informasi berdasarkan data yang digunakan. Teknik tersebut digunakan untuk mengoleksi, mengatur, merungkas, mendeskripsikan, dan mempresentasikan informasi numerik. Hasil dari statistika deskriptif berupa Tabel ringkasan dan data yang diubah menjadi grafik.

## 2.7 Gutenberg-Richter

Gutenberg & Richter (1954) menjelaskan model *Gutenberg-Richter* sering digunakan untuk menentukan hubungan frekuensi magnitudo dalam melakukan analisis risiko gempa yang dinotasikan sebagai.

$$y = \log N = a - bM \quad (2.1)$$

dimana  $M$  magnitudo serta  $N$  frekuensi gempa bumi kumulatif yang menunjukkan jumlah gempa dengan nilai magnitudo sama atau lebih besar. Model memiliki tanda negatif dikarenakan parameter memiliki korelasi satu sama lain. Artinya jika nilai  $b$  atau magnitudo memiliki nilai tinggi maka nilai  $a$  atau frekuensi gempa akan semakin kecil. Sebaliknya jika nilai  $b$  memiliki nilai rendah maka nilai  $a$  akan semakin besar juga. Parameter  $a$  dan  $b$  merupakan parameter regresi yang dihitung menggunakan metode *Least Squares* (LS). Menghitung estimasi parameter  $a$  dan  $b$  menggunakan rumus persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} SSE &= \sum_{i=1}^k (y_i - \hat{y}_1)^2 \\ &= \sum_{i=1}^k [y_i - (\hat{a} - \hat{b}M)]^2 \end{aligned}$$

dari persamaan di atas dapat menggunakan turunan parsial untuk mencari nilai parameter  $a$  dan  $b$  seperti pada berikut.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial SSE}{\partial \hat{a}} &= \frac{\partial \left\{ \sum_{i=1}^k [y_i - (\hat{a} - \hat{b}M)]^2 \right\}}{\partial \hat{a}} = 0 \\
&= \sum_{i=1}^k 2 [y_i - (\hat{a} - \hat{b}M)] \\
&= -2 \left( \sum_{i=1}^k y_i - k\hat{a} + \hat{b} \sum_{i=1}^k M \right) \\
\hat{a} &= \frac{\sum_{i=1}^k y_i}{k} + \frac{\hat{b} \sum_{i=1}^k M}{k} \\
&= \bar{y} + b\bar{M}
\end{aligned} \tag{2.2}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial SSE}{\partial \hat{b}} &= \frac{\partial \left\{ \sum_{i=1}^k [y_i - (\hat{a} - \hat{b}M)]^2 \right\}}{\partial \hat{b}} = 0 \\
&= \sum_{i=1}^k 2 [y_i - (\hat{a} - \hat{b}M)] = 0 \\
&= -2 \left( \sum_{i=1}^k y_i M_i - \hat{a} \sum_{i=1}^k M_i + \hat{b} \sum_{i=1}^k M_i^2 \right) = 0 \\
&= \sum_{i=1}^k M_i y_i - \hat{a} \sum_{i=1}^k M_i + \hat{b} \sum_{i=1}^k M_i^2 \\
\sum_{i=1}^k M_i y_i &= \hat{a} \sum_{i=1}^k M_i - \hat{b} \sum_{i=1}^k M_i^2 \\
\sum_{i=1}^k M_i y_i &= \left( \frac{\sum_{i=1}^k y_i}{k} + \frac{\hat{b} \sum_{i=1}^k M_i}{k} \right) \sum_{i=1}^k M_i - \hat{b} \sum_{i=1}^k M_i^2 \\
\sum_{i=1}^k M_i y_i &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k M_i \sum_{i=1}^k y_i + \frac{\hat{b}}{k} \left( \sum_{i=1}^k M_i \right)^2 - \hat{b} \sum_{i=1}^k M_i^2 \\
-\hat{b} \left( \sum_{i=1}^k M_i^2 - \frac{1}{k} \left( \sum_{i=1}^k M_i \right)^2 \right) &= \sum_{i=1}^k M_i y_i - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k M_i \sum_{i=1}^k y_i \\
-\hat{b} &= \frac{\sum_{i=1}^k M_i y_i - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k M_i \sum_{i=1}^k y_i}{\left( \sum_{i=1}^k M_i^2 - \frac{1}{k} \left( \sum_{i=1}^k M_i \right)^2 \right)} \\
&= -\frac{\sum_{i=1}^k M_i y_i - k\bar{M}\bar{Y}}{\sum_{i=1}^k M_i^2 - k\bar{M}^2}
\end{aligned} \tag{2.3}$$

dengan  $k$  merupakan jumlah kelompok,  $y$  adalah nilai dari log frekuensi kumulatif,  $\bar{y}$  adalah mean frekuensi dan  $\bar{M}$  adalah mean magnitudo.

Selain menggunakan LS, nilai parameter  $a$  dan  $b$  dapat dihitung menggunakan *Maximum Likelihood* (MLE). Definisi *likelihood* yaitu suatu penentuan nilai parameter ditentukan suatu hasil yang diamati adalah sama dengan probabilitas dari suatu hasil pengamatan yang

ditentukan nilai parameternya. Bila suatu fungsi distribusi probabilitas bergantung pada parameter  $\theta$  bersesuaian dengan fungsi *likelihood* yang ditulis sebagai berikut.

$$L(X_i\theta) = f(x_1, \theta), f(x_2, \theta), \dots, f(x_n, \theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i, \theta)$$

$L$  merupakan fungsi dari *likelihood*. Nilai fungsi maksimum  $L(X_i\theta)$  merupakan estimasi *Maximum Likelihood* dari  $\theta$  untuk perhitungan yang bersesuaian. Penurunan dari  $L(X_i\theta)$  yang umumnya untuk mendapatkan nilai maksimum dari  $L(\theta)$  atau persamaan *Maximum Likelihood* yaitu

$$\frac{\partial \ln L(\theta)}{\partial \theta} = 0$$

Penurunan tersebut berguna untuk mempermudah penafsiran, jika terdapat nilai maksimum serta terdapat satu atau lebih penyelesaian dari persamaan  $\frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta}$  maka persamaan tersebut menjadi benar. Catatannya terdapat nilai  $\theta$  maksimum yang juga akan memaksimumkan *log-likelihood* dan  $\ln \theta$  (Suryani, 2007).

Aki (1965) berpendapat, metode ini dapat dipergunakan untuk masalah hubungan frekuensi dan magnitudo gempa bumi. Suatu fungsi distribusi probabilitas dari magnitudo dapat dituliskan ke dalam bentuk.

$$f(M, b') = b' e^{-b'(M-M_0)}; M \geq M_0$$

dimana  $b'$  adalah  $b \ln 10$ . Bersesuaian dengan fungsi *likelihood* dapat ditunjukkan sebagai berikut.

$$P = (b')^N e^{-b'(\sum_{i=1}^n M_i - NM_0)}$$

dari hubungan ini diperoleh bahwa estimasi *Maximum Likelihood* dari nilai  $b$  yang ditunjukkan sebagai berikut.

$$b = \frac{\log e}{\bar{M} - M_0} \quad (2.4)$$

Selang kepercayaan dari  $b'$  untuk probabilitas tertentu  $Pr$  yaitu (Aki, 1965).

$$Pr \left( b' \left( 1 - \frac{W_z}{\sqrt{N}} \right) \leq b' \leq b' \left( 1 + \frac{W_z}{\sqrt{N}} \right) \right)$$

Bila diberikan probabilitas untuk 95%,  $W_z=1,96$ . Menghasilkan batas atas ( $\bar{b}$ ) dan batas selang keyakinan atau bawah ( $\tilde{b}$ ) dari nilai  $b'$  yang ditentukan dengan metode ini.

$$\bar{b} = b \left( 1 + \frac{1,96}{\sqrt{N}} \right) \text{ dan } \tilde{b} = b \left( 1 - \frac{1,96}{\sqrt{N}} \right)$$

Bersesuaian dengan nilai  $a$  yang diberikan dari hubungan frekuensi kumulatif untuk  $M \geq M_0$  adalah

$$a = \log N(\bar{M} \geq M_0) + \log(b \ln 10) + M_0 b \quad (2.5)$$

$\bar{M}$  adalah magnitudo rata-rata dari data gempa dan  $M_0$  magnitudo minimum (Suryani, 2007).

Pada perhitungan probabilitas untuk terjadinya gempa bumi dan periode ulang dapat dilakukan dengan metode poisson. Diasumsikan bahwa kejadian gempa bumi dengan magnitudo tertentu dalam jangka waktu tertentu dengan parameter risiko gempa bumi di definisikan sebagai berikut (Kara, 2017).

$$n(M) = 10^{a_1 - bM} \quad (2.6)$$

$$R(M) = 1 - e^{-n(M)T} \quad (2.7)$$

$$Q(T) = \frac{1}{n(M)} \quad (2.8)$$

Dengan,

$n(M)$  = Jumlah rata-rata tahunan gempa bumi

$R(M)$  = Risiko terjadinya gempa bumi dengan magnitudo  $M$  dalam  $T$  tahun

$Q(T)$  = Periode pengulangan

$T$  = Rentang waktu pengamatan

Untuk mencari nilai  $a'_1$  dapat menggunakan rumus.

$$a' = a - \text{Log}(b \text{Ln } 10) \quad (2.9)$$

$$a_1 = a - \log(t) \quad (2.10)$$

$$a'_1 = a' - \text{Log}(t) \quad (2.11)$$

$t$  merupakan periode tahun penelitian. Dalam perhitungan  $n(M)$  menggunakan rumus  $a'_1$  dikarenakan dalam perhitungan parameter menggunakan nilai  $a$  yang dimana masih menggunakan periode tahun penelitian (14 tahun). Perlu merubah kedalam tiap tahunnya agar bisa menganalisis risiko gempa bumi yang akan datang.

## 2.8 Analisis Gutenberg-Ritcher berbasis Bayesian

*Bayesian* adalah algoritma klasifikasi statistik dimana berfungsi untuk melakukan prediksi secara probabilitas pada anggota suatu peristiwa (Jananto, 2013). Ayuputri (2018) juga menyatakan bahwa Bayesian merupakan salah satu metode pendekatan untuk melakukan estimasi parameter yang dimana dalam pengambilan keputusannya Bayesian memandang parameter  $\beta$  adalah sebagai variabel random yang memiliki distribusi disebut distribusi *Prior*. Fungsi dari distribusi *Prior* yaitu untuk mencari distribusi *Posterior* sehingga mendapatkan estimator Bayesian berupa mean atau modus dari distribusi *Posterior*. Distribusi *Prior* secara umum terdapat 4 macam yaitu.

1. *Conjugate prior* dan *non conjugate prior* distribution, mengacu pada analisis model dalam pembentukan fungsi likelihood.
2. *Informative prior* dan *non informative prior* distribution, pemberian parameter distribusi *prior* didasarkan pada informasi yang diperoleh sebelumnya.
3. *Proper prior* dan *Improper prior* distribution, *prior* berhubungan pada pemberian pebobotan atau densitas disetiap titik sudah berdistribusi uniform atau tidak.
4. *Pseudo prior*, mengacu pada pemberian nilai yang disetarakan dengan hasil elaborasi dari *frequentist* (Abdullah dkk, 2021).

Distribusi *Posterior* dari parameter  $\beta$  dihitung dengan menggunakan *teorema Bayes* yang dituliskan sebagai berikut.

$$P(\beta|x) = \frac{l(x|\beta)P(\beta)}{P(x)} \quad (2.12)$$

Dengan,

$x$  = Data Observasi

$\beta$  = Parameter

$P(\beta)$  = Informasi *Prior* vektor parameter

$P(x)$  = Konstanta persamaan *Bayes* yang merupakan nilai total probabilitas

$P(\beta|x)$  = Informasi *Posterior*

$l(x|\beta)$  = Informasi sampel yang terdapat dalam *likelihood* data

Untuk dapat menentukan *Prior*, Box & Tiao (1973) dalam Ayuputri (2018) berpendapat bahwa penentuan tersebut dilakukan berdasarkan informasi data parameter dari penelitian sebelumnya. *Markov Chain Monte Carlo* (MCMC) merupakan pendekatan yang dapat digunakan untuk mengatasi masalah dalam proses integrasi yang cukup panjang dan rumit untuk mendapatkan distribusi *posterior*. Ide dasarnya adalah membangkitkan *Markov Chain* dengan simulasi *Monte Carlo* yang beriterasi. Menurut Ntzoufras (2009) dalam Ayuputri (2018), membangkitkan data sampel parameter  $\beta$  yang memiliki distribusi tertentu menggunakan *gibbs sampling* yang didefinisikan suatu teknik simulasi untuk membangkitkan variabel random dari suatu fungsi distribusi tertentu tanpa harus menghitung fungsi densitasnya. Dalam proses *gibbs sampling* dilakukan pengambilan sampel dengan metode membangkitkan rangkaian *gibbs* variabel random yang didasari dari sifat-sifat dasar dalam proses *markov chain*. Parameter  $\beta$  akan dibagi menjadi beberapa bagian oleh *gibbs sampling* yaitu  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p)$  (Casella & George, 1992).

Menurut Oktaviana dan Fithriasari (2017) untuk dapat melanjutkan ke analisis bayesian kondisi yang harus dipenuhi distribusi posterior adalah

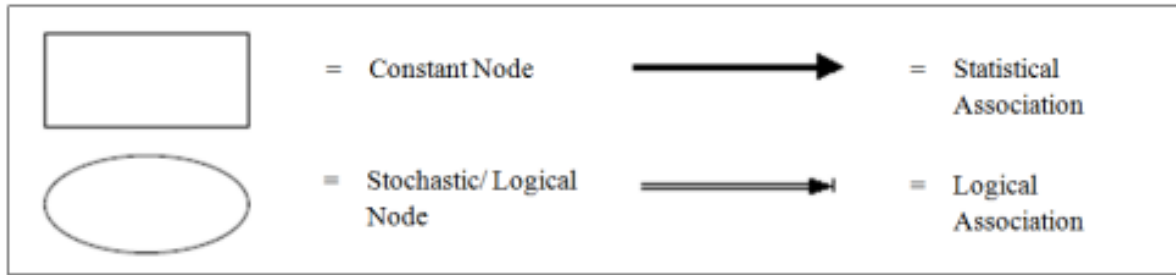
1. Stationer, merupakan gambaran sebuah tren naik atau turun pada nilai parameter dengan melihat *time series plot* dari *history chain*. Jika parameter belum memenuhi distribusi stationer maka dilakukan “burn-in period” yaitu menghilangkan bagian awal dari rantai karena tidak menunjukkan kesesuaian sampel dari distribusi tertentu serta menghindari *initial value*.
2. Konvergen, pengecekannya dapat melihat pada statistik *Gelman-Rubin*. Dimana pengujiannya dengan mendefinisikan beberapa rantai dari nilai awal yang *over-dispersed*.
3. Distribusi Normalitas, fungsinya yaitu untuk mengetahui sebaran data distribusi residual dari parameter dengan melihat grafik distribusi normal.

Dalam pengecekan kondisi yang harus dipenuhi distribusi posterior dilakukan dengan menggunakan beberapa *chain* atau rantai tertentu. Semakin banyak rantai yang digunakan akan dapat lebih mudah untuk menilai kinerja parameter. Pada saat distribusi *posterior* tidak memenuhi kondisi maka dilakukan penambahan iterasi. Penambahan atau update dilakukan secara terus menerus sampai memenuhi kondisi yang sudah ditentukan.

## 2.9 Bayesian Network Inference

Pengertian *bayesian network* adalah sebuah model grafis yang didalamnya berupa *node*, *arrows/arcs*. Kumpulan terbatas dari *node* bersama dengan kumpulan *arrows* diantara *nodes* membuat struktur matematika yaitu *direct graph* yang terhubung tanpa *cycles* biasa disebut dengan *directed acyclic graph* (DAG). *Bayesian network* sebagai DAG menjelaskan bahwa *nodes* menunjukkan variabel random yang diskrit atau kontinu. *Discrete nodes* bisa termasuk kualitatif ataupun kuantitatif mengambil bilangan bulat dengan kumpulan *mutually exclusive states* terbatas. Fungsi *arcs* untuk menunjukkan hubungan diantara variabel. Setiap variabel  $X$  dengan *parents*  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  terdapat *conditional probability table* terkait  $Pr(X|Y_1, Y_2, \dots, Y_n, I)$ ,  $I$  merupakan pengetahuan relevan yang tidak ditunjukkan secara eksplisit sebagai *nodes* dalam grafik (Taroni dkk, 2014).

Liu (2012) dalam Oktaviana dan Fithriasari (2017) menjelaskan DAG berfungsi sebagai ilustrasi semua parameter serta variabel pada model lalu dihubungkan menggunakan tepi-tepinya. Penjelasan ikon untuk DAG disajikan dalam Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Spesifikasi Ikon pada DAG (Sumber: Oktaviana dan Fithriasari 2017)

Dari Gambar 2.2, terdapat 3 jenis *nodes* dan memiliki kegunaannya masing masing yaitu.

1. *Constant Nodes*, berfungsi sebagai ikon dari variabel acak, dapat dimisalkan  $x_i \sim N(\mu, \sigma^2)$ .
2. *Stochastic Node*, berfungsi sebagai ikon dari variabel yang akan dideskripsikan oleh variabel lainnya, pada umumnya untuk prediksi, misalnya  $\mu_i = \beta_0 + \beta_1 x_i$ .
3. *Logical Node*, berfungsi sebagai ikon dari nilai observasi, *hyper-parameter* atau konstan, misalkan  $N = 100, x_i$ .

### 2.10 Akaike Information Criterion (AIC)

Memilih kriteria model terbaik yang sesuai dengan data dari *Gutteberg Ritche* dan *Gutteberg Ritche* berbasis *Bayesian* dapat menggunakan *Akaike Information Criterion* (AIC). AIC sendiri diperkenalkan oleh Akaike yang dimana idenya adalah semakin kecil nilai AIC dari suatu model, maka model yang digunakan semakin baik. Dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$AIC = 2K - 2\ln(L) \quad (2.13)$$

$K$  merupakan jumlah variabel independen yang digunakan dan  $L$  adalah *log-likelihood* estimator yang mampu memproduksi variabel dependen yang diobservasi model (Adams dkk, 2020)

### 2.11 Pemetaan

Pemetaan merupakan suatu proses kegiatan yang berguna untuk menghasilkan peta yang meliputi tahapan akuisasi data dengan survey terestris, survey global positioning system (GPS). Dari survey tersebut, dilakukan pengolahan data yang ditujukan untuk menghasilkan visualisasi data serta informasi dalam bentuk peta analog maupun peta digital. Manfaat peta sebagai informasi pokok dari keruangan tentang daerah tersebut dan sebagai alat analisis dalam mendapatkan suatu kesimpulan. Peta dapat dikelompokkan menjadi 2 macam yaitu peta umum dan peta khusus. Peta umum berisi gambaran mengenai permukaan bumi, seperti gunung, bukit, pemukiman, dan lainnya. Peta khusus atau disebut peta tematik adalah peta yang memperlihatkan data secara kualitatif atau kuantitatif pada unsur yang spesifik seperti Peta kepadatan penduduk, peta penggunaan dan lain sebagainya (Sutrisno, 2018).

Utami & Indardi (2019) berpendapat pemetaan adalah suatu rangkaian kegiatan yang melibatkan berbagai ilmu seperti geodesi, pemotretan udara, fotogrametri, kartografi, geografi, dan teknik pencetakan peta. Peran ilmu geodesi yaitu dalam pembuatan kerangka dasar, pengumpulan data, perhitungan proyeksi serta penyusunan manuskrip. Fotogrametri berperan sebagai pengubah foto udara menjadi manuskrip. Kartografi perannya dalam mengolah manuskrip menjadi suatu peta yang siap untuk dicetak. Pengertian manuskrip merupakan suatu gambar hasil plotting atau kartiran dari data awal yang siap untuk diproses menjadi peta. Pembuatan peta sangat bergantung pada skala peta yang akan dibuat. Semakin besar skala peta



semakin teliti posisi data yang akan disajikan, begitu pula sebaliknya. Tahapan pembuatan peta secara umum meliputi sebagai berikut.

- a. Pengumpulan data, pengumpulan, penyusunan, dan evaluasi dari sumber data yang digunakan untuk peta yang akan dibuat . Kegiatan yang dilakukan seperti pengukuran panjang atau jarak, luas, dan sudut serta observasi lapang.
- b. Pengolahan data, biasanya kegiatan yang dilakukan meliputi klasifikasi data, spesifikasi simbol, dan desain peta dasar.
- c. Penggambaran kasar meliputi pembuatan peta manuskrip, hasil pengolahan data yang sudah diklasifikasi kemudian diplotkan di atas media gambar. Dilanjutkan pembuatan garis yang menghubungkan data ukur sehingga akan tergambar peta manuskrip.
- d. Reproduksi merupakan kegiatan penggambaran halus yang meliputi desain dari isi peta dan lay out peta, serta pemilihan warna.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB III METODOLOGI

### 3.1 Sumber Data

Data yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari beberapa sumber yaitu data Gempa Bumi di Indonesia dari laman website <http://repogempa.bmkg.go.id> dan <http://dataonline.bmkg.go.id>. Periode data yang diambil berasal dari November tahun 2008 sampai dengan Februari tahun 2022.

### 3.2 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini, variabel yang digunakan yaitu frekuensi, dan magnitudo gempa bumi. Data yang diperlukan merupakan data harian dengan periode 2008 – 2022. Variabel penelitian yang akan digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.1

**Tabel 3.1** Variabel Penelitian

Variabel	Keterangan	Skala	Definisi
$n$	Frekuensi Gempa Bumi	Rasio	Jumlah kejadian gempa bumi di seluruh Indonesia
$N$	Frekuensi Kumulatif Gempa bumi	Rasio	Jumlah akhir semua frekuensi sampai batas tertentu dalam data gempa bumi
$M$	Magnitudo Gempa Bumi	Rasio	Kekuatan yang dihasilkan dalam bencana gempa bumi

Struktur data awal pada penelitian ini ditunjukkan dengan pada Tabel 3.2 berikut.

**Tabel 3.2** Struktur Data Awal

Tanggal	Waktu	Latitude	Longitudinal	Magnitudo	Wilayah
1 November 2008	00:31	$Lat_1$	$Lon_1$	$M_1$	$W_1$
1 November 2008	01:34	$Lat_2$	$Lon_2$	$M_2$	$W_2$
1 November 2008	01:38	$Lat_3$	$Lon_3$	$M_3$	$W_3$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
28 Februari 2022	23:22	$Lat_n$	$Lon_n$	$M_n$	$W_n$

Dari data awal yang diperoleh, dilakukan pemetaan wilayah berdasarkan latitudinal dan longitudinal dalam peta dengan membatasi wilayahnya. Pembagian wilayah menghasilkan beberapa area yang akan diteliti satu per-satu untuk tiap wilayah grid. Struktur data akhir yang dihasilkan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.3 yaitu.

**Tabel 3.3** Struktur Data Akhir

$M$	$n$	$N$	$LogN$
$M_{1,0}$	$n_1$	$\sum_{i=1}^n N_i$	$LogN_1$
$M_{1,1}$	$n_2$	$\sum_{i=2}^n N_i$	$LogN_2$
$M_{1,2}$	$n_3$	$\sum_{i=3}^n N_i$	$LogN_3$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$M_{9,5}$	$n_n$	$N_n$	$LogN_n$

### 3.3 Pembagian Grid

Penelitian ini membagi peta wilayah Indonesia menjadi 60 grid dengan keterangan sebagai berikut.

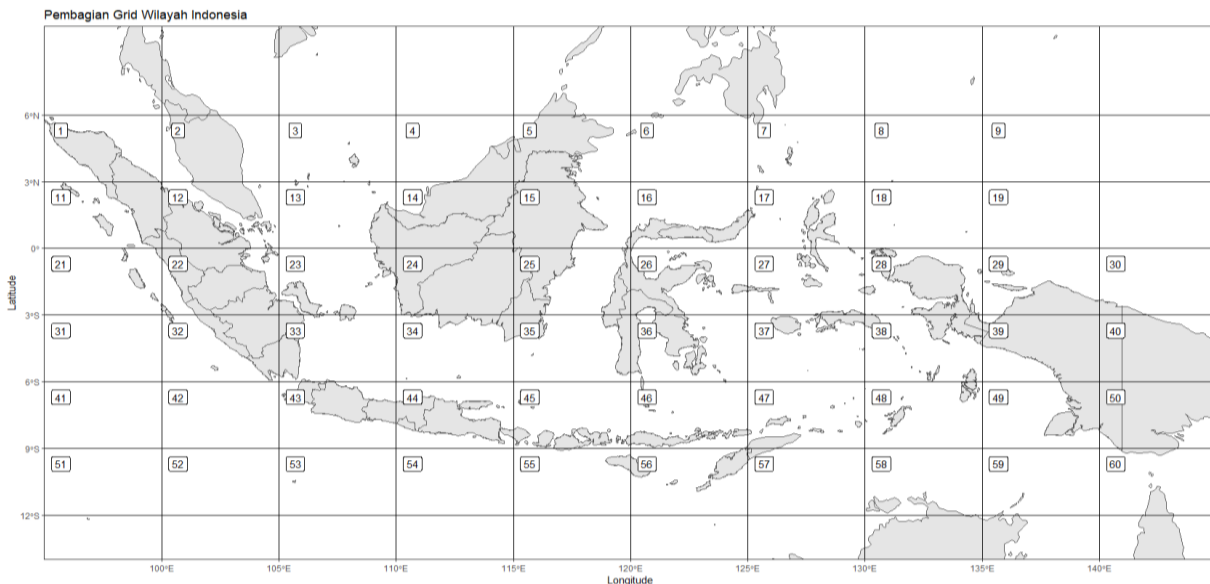
- a. Garis lintang dibagi menjadi interval 3°.
- b. Garis bujur dibagi menjadi interval 5°

Sehingga luas satu grid adalah sebesar 3° garis lintang x 5° garis bujur. Pembagian wilayah dilakukan untuk mempersempit ukuran wilayah pengamatan sehingga menghasilkan analisa yang lebih akurat. Tabel 3.4 menunjukkan batasan untuk setiap grid yang menjadi wilayah penelitian.

Tabel 3.4 Pembagian Wilayah Penelitian

Grid	Bujur	Lintang	Grid	Bujur	Lintang	Grid	Bujur	Lintang
1	95° - 100°	3° - 6° N	21	95° - 100°	0° - 3° S	41	95° - 100°	6° - 9° S
2	100° - 105°	3° - 6° N	22	100° - 105°	0° - 3° S	42	100° - 105°	6° - 9° S
3	105° - 110°	3° - 6° N	23	105° - 110°	0° - 3° S	43	105° - 110°	6° - 9° S
4	110° - 115°	3° - 6° N	24	110° - 115°	0° - 3° S	44	110° - 115°	6° - 9° S
5	115° - 120°	3° - 6° N	25	115° - 120°	0° - 3° S	45	115° - 120°	6° - 9° S
6	120° - 125°	3° - 6° N	26	120° - 125°	0° - 3° S	46	120° - 125°	6° - 9° S
7	125° - 130°	3° - 6° N	27	125° - 130°	0° - 3° S	47	125° - 130°	6° - 9° S
8	130° - 135°	3° - 6° N	28	130° - 135°	0° - 3° S	48	130° - 135°	6° - 9° S
9	135° - 140°	3° - 6° N	29	135° - 140°	0° - 3° S	49	135° - 140°	6° - 9° S
10	140° - 145°	3° - 6° N	30	140° - 145°	0° - 3° S	50	140° - 145°	6° - 9° S
11	95° - 100°	0° - 3° N	31	95° - 100°	3° - 6° S	51	95° - 100°	9° - 12° S
12	100° - 105°	0° - 3° N	32	100° - 105°	3° - 6° S	52	100° - 105°	9° - 12° S
13	105° - 110°	0° - 3° N	33	105° - 110°	3° - 6° S	53	105° - 110°	9° - 12° S
14	110° - 115°	0° - 3° N	34	110° - 115°	3° - 6° S	54	110° - 115°	9° - 12° S
15	115° - 120°	0° - 3° N	35	115° - 120°	3° - 6° S	55	115° - 120°	9° - 12° S
16	120° - 125°	0° - 3° N	36	120° - 125°	3° - 6° S	56	120° - 125°	9° - 12° S
17	125° - 130°	0° - 3° N	37	125° - 130°	3° - 6° S	57	125° - 130°	9° - 12° S
18	130° - 135°	0° - 3° N	38	130° - 135°	3° - 6° S	58	130° - 135°	9° - 12° S
19	135° - 140°	0° - 3° N	39	135° - 140°	3° - 6° S	59	135° - 140°	9° - 12° S
20	140° - 145°	0° - 3° N	40	140° - 145°	3° - 6° S	60	140° - 145°	9° - 12° S

Dari hasil pembagian wilayah, dapat divisualisasikan seperti pada Gambar 3.



Gambar 3.1 Visualisasi Pembagian Wilayah Penelitian

Hasil pembagian wilayah penelitian dari 60 grid teralokasi menjadi 39 grid yang masuk ke dalam wilayah Indonesia.

### 3.4 Metode Analisis

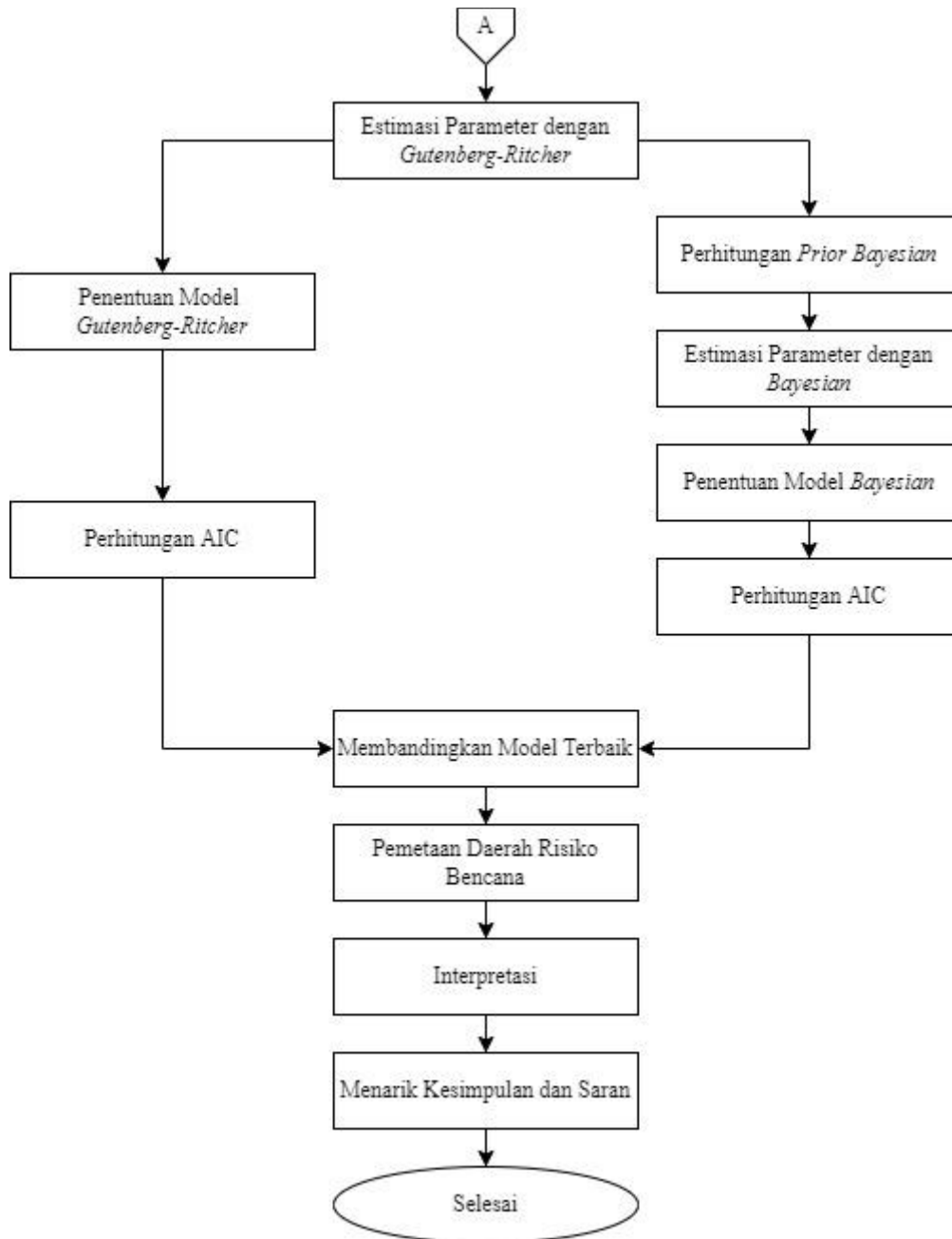
Metode analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Gutenberg-Ritcher Model* dan *Bayesian* untuk mengetahui hubungan Magnitudo-Frekuensi dengan membandingkan model yang dihasilkan dari kedua metode tersebut serta dapat memetakan daerah risiko gempa bumi di Indonesia. Proses analisis data dilakukan menggunakan *software Rstudio*. Tahapan analisis data dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengumpulkan dan menginputkan data dari website Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) dalam periode 2008-2022.
2. Menentukan variabel dari data gempa bumi yang telah dikumpulkan.
3. Melakukan pemetaan wilayah Indonesia berdasarkan garis bujur dan garis lintang.
4. Menganalisis perhitungan statistika deskriptif terhadap variabel yang digunakan.
5. Menghitung nilai parameter  $a$  dan  $b$  dengan menggunakan rumus perhitungan *Gutenberg-Ritcher* berdasarkan persamaan 2.2 dan 2.3.
6. Parameter hasil dari tahap (5), menyusun model hubungan magnitudo-frekuensi dengan menggunakan metode *Gutenberg-Ritcher* sesuai dengan persamaan 2.1.
7. Nilai parameter yang dihasilkan *Gutenberg-Ritcher*, digunakan untuk menghitung nilai parameter metode *Bayesian*. Konsep dari perhitungannya yaitu nilai *Prior* didapatkan dari hasil parameter *Gutenberg-Ritcher*.
8. Memodelkan nilai parameter *Bayesian* kedalam hubungan magnitudo-frekuensi yang sesuai dengan persamaan 2.12.
9. Menghitung nilai AIC berdasarkan kedua model *Gutenberg-Ritcher* dan *Gutenberg-Ritcher* berbasis *Bayesian* dengan persamaan 2.13.
10. Membandingkan model terbaik dari hasil *Gutenberg-Ritcher* dan *Gutenberg-Ritcher* berbasis *Bayesian* berdasarkan nilai AIC.
11. Melakukan pemetaan daerah risiko bencana berdasarkan hasil pemodelan gempa bumi dari kedua metode.
12. Menarik kesimpulan dan menentukan saran berdasarkan hasil analisis data.

Tahapan proses penelitian analisis berdasarkan langkah di atas sesuai pada Gambar berikut.



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian



**Gambar 3.3** Diagram Alir Penelitian (Lanjutan)

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pemetaan Wilayah Indonesia

Indonesia memiliki wilayah yang terletak pada 6° LU - 11° LS dan 95° BT - 141° BT. Dalam penelitian ini, wilayah Indonesia akan dibagi menjadi beberapa grid. Setelah melakukan pembagian berdasarkan interval yang telah ditentukan, maka dilanjutkan pemberian warna untuk melihat daerah mana saja yang termasuk ke dalam wilayah Indonesia. Pembagian grid serta pemberian warna dapat ditampilkan pada Gambar 4.1. Dari Gambar tersebut, dapat diambil beberapa wilayah yang mencakup daerah Indonesia yaitu terdapat 39 grid dengan keterangan terdapat pada Tabel 4.1 dibawah ini.

**Tabel 4.1** Wilayah yang Terdapat Dalam 39 Grid Penelitian

Grid	Wilayah	Grid	Wilayah
1	Aceh dan sebagian Sumatera Utara	30	Papua
3	Kalimantan Barat	32	Bengkulu, sebagian wilayah Lampung dan Sumatera Selatan
5	Kalimantan Tengah	33	Lampung
7	Sulawesi Utara	34	Kalimantan Tengah dan Kalimantan Selatan
11	sebagian Aceh dan Sumatera Utara	35	Kalimantan Selatan dan Sulawesi Barat
12	Riau	36	Sulawesi Tenggara
13	Sumatera Selatan	37	Maluku Utara
14	Kalimantan Barat	38	Maluku
15	Kalimantan Timur	39	Papua
16	Sulawesi Utara	40	Papua
17	Maluku Utara	43	Banten, Jakarta, dan Jawa Barat
21	Sumatera Barat	44	Jawa Tengah, Yogyakarta, dan Jawa Timur
22	Jambi, Bengkulu, dan Sumatera Tengah	45	Bali dan Nusa Tenggara Barat
23	Bangka Belitung	46	Nusa Tenggara Timur
24	Kalimantan Tengah	47	Maluku
25	Kalimantan Selatan, Kalimantan Timur, dan Sulawesi Selatan	48	Maluku
26	Sulawesi Tengah	49	Papua
27	Maluku Utara	50	Papua
28	Papua Barat	56	Nusa Tenggara Timur
29	Papua		

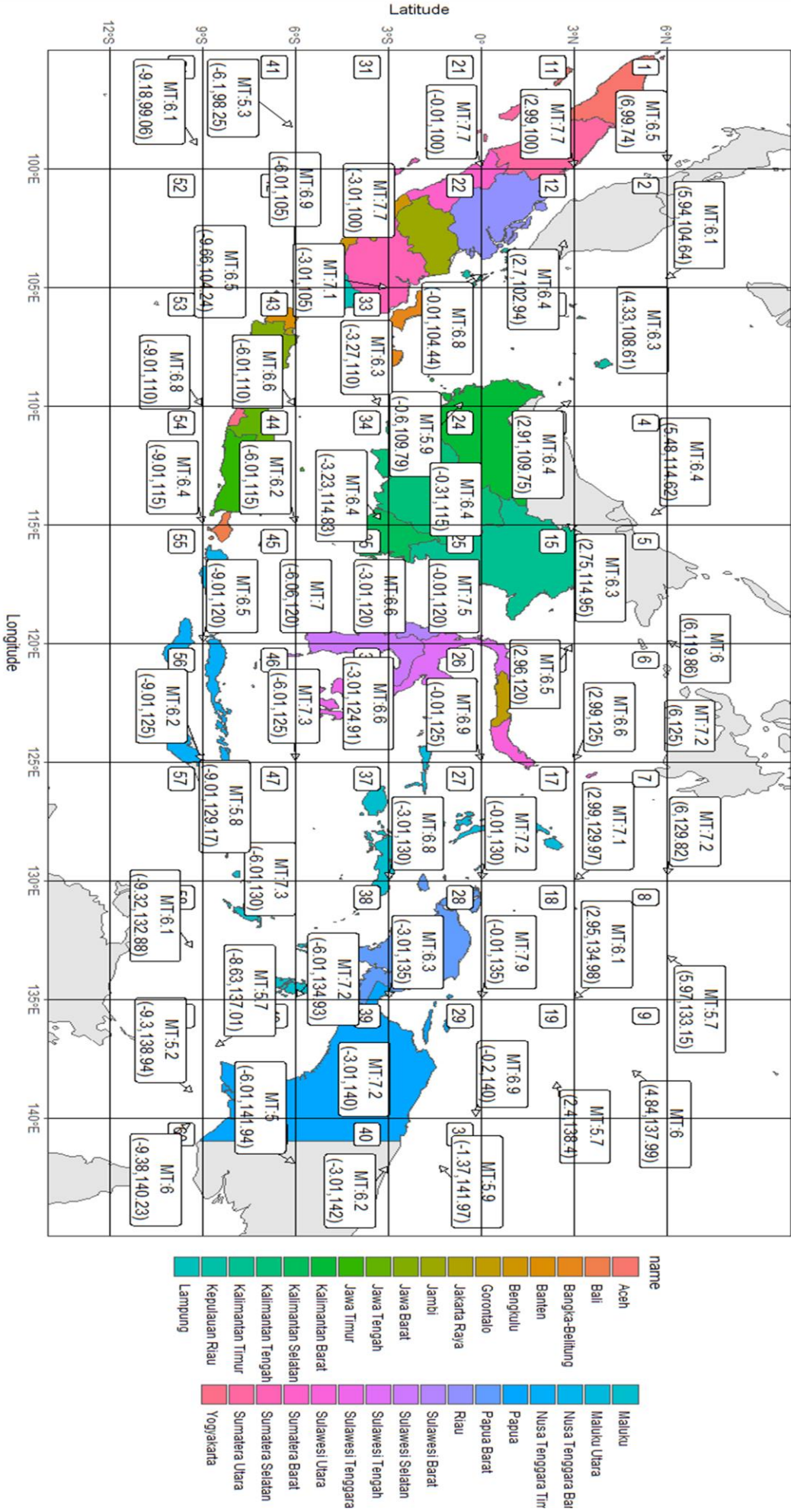
### 4.2 Karakteristik Data Gempa Bumi

Analisis karakteristik data gempa bumi dalam penelitian ini perlu dilakukan agar mengetahui gambaran secara umum dari data keseluruhan gempa bumi dan data tiap grid yang akan berguna untuk tahap selanjutnya. Data yang digunakan adalah data gempa bumi seluruh wilayah Indonesia dari tanggal 1 November 2008 sampai 28 Februari 2022 dengan nilai magnitudo secara keseluruhan yang bersumber dari BMKG.

#### 4.2.1 Karakteristik Data Keseluruhan Gempa Bumi

Data yang dikumpulkan selama 14 tahun dapat memberikan gambaran atau deskriptif yang dilihat dari nilai rata-rata (*mean*), maksimum, minimum, median, standart deviasi, kuartil

### Pembagian Grid Wilayah Indonesia



Gambar 4.1 Gambar Peta Indonesia

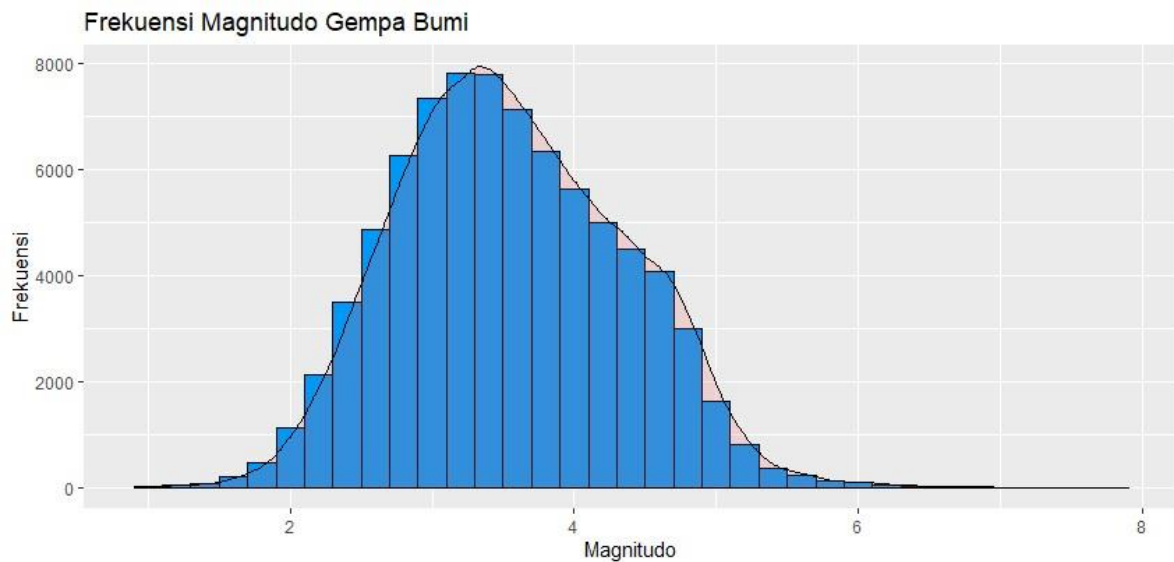


satu, kuartil tiga, dan total data yang didapat. Satuan magnitudo gempa bumi menggunakan skala Richter. Hasil statistik deskriptif digambarkan pada Tabel 4.2 berikut.

**Tabel 4.2** Karakteristik Deskriptif Data Magnitudo Gempa Bumi di Indonesia

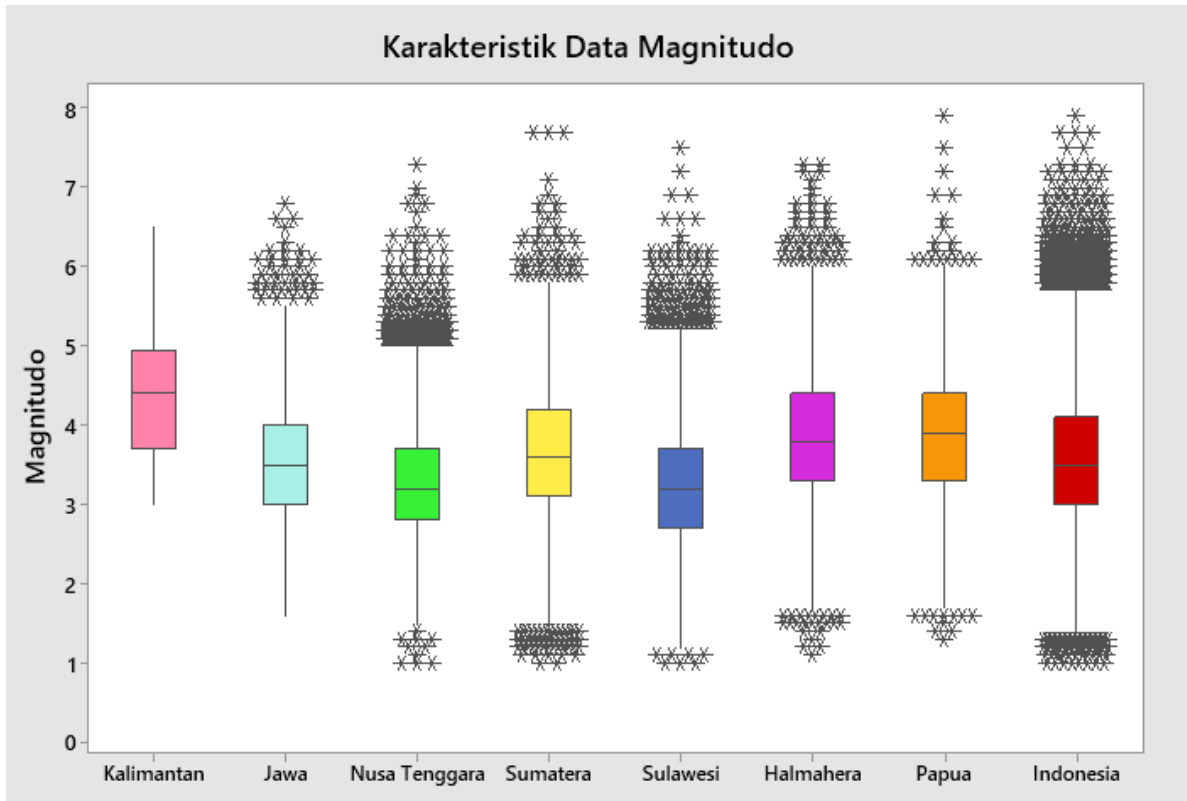
Karakteristik	Nilai
Jumlah Data	80.610
Minimal	1,0
Maksimal	7,9
Mean	3,568
Median	3,50
Kuartil Satu	3,0
Kuartil Tiga	4,1
Standart Deviasi	0,8055

Data dalam penelitian ini memiliki jumlah gempa bumi yang terjadi di Indonesia sebanyak 80.610 data. Magnitudo gempa terbesar memiliki kekuatan 7,9 skala *Richter* terdapat di wilayah Papua dan kekuatan terkecilnya sebesar 1 skala *Richter* terdapat di wilayah Flores, Sulawesi, dan Sumatra Selatan dengan nilai rata-rata magnitudo sebesar 3,5. Nilai masing-masing kuartil satu dan kuartil tiga sebesar 3,0 dan 4,1. Untuk median menghasilkan nilai sebesar 3,5 serta nilai standar deviasi sebesar 0,8055. Identifikasi nilai tertinggi magnitudo yang terjadi dapat dilihat dalam histogram pada Gambar 4.2 berikut.



**Gambar 4.2** Histogram Data Magnitudo Gempa Bumi di Indonesia

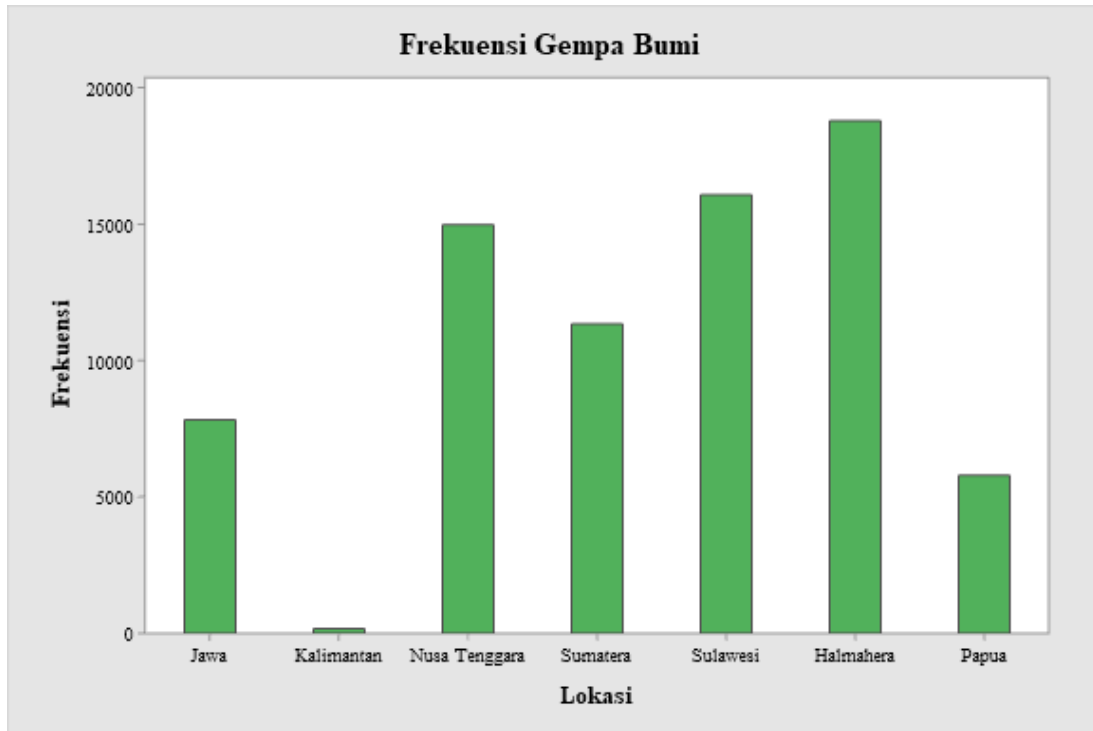
Gambar 4.2 menjelaskan bahwa magnitudo antara 2 sampai 4 skala *Richter* merupakan kekuatan gempa bumi yang sering terjadi di Indonesia. Karakteristik deskriptif data magnitudo gempa bumi di Indonesia serta wilayah lainnya dapat juga di visualisasikan dalam bentuk boxplot Gambar 4.3. Dibuat beberapa boxplot yang dapat mendiskripsikan beberapa wilayah yang mengalami gempa bumi. Wilayah dibagi menjadi 6 yaitu Indonesia, Sulawesi, Nusa Tenggara, Maluku, Kalimantan, Jawa, Sumatera, Halmahera, dan Luar Negeri. Wilayah Sulawesi menghasilkan magnitudo gempa terbesar memiliki kekuatan 7,5 skala *Richter* terdapat dan kekuatan terkecilnya sebesar 1 skala *Richter* dengan nilai rata-rata magnitudo sebesar 3,274. Nilai masing-masing kuartil satu dan kuartil tiga sebesar 2,7 dan 3,7. Untuk median menghasilkan nilai sebesar 3,2 serta nilai standar deviasi sebesar 0,7479.



**Gambar 4.3** Boxplot Karakteristik Data Magnitudo Gempa Bumi

Wilayah Nusa Tenggara menghasilkan magnitudo gempa terbesar memiliki kekuatan 7,3 skala *Ritcher* terdapat dan kekuatan terkecilnya sebesar 1 skala *Ritcher* dengan nilai rata-rata magnitudo sebesar 3,28. Nilai masing-masing kuartil satu dan kuartil tiga sebesar 2,8 dan 3,7. Untuk median menghasilkan nilai sebesar 3,2 serta nilai standar deviasi sebesar 0,7137. Wilayah Papua menghasilkan magnitudo gempa terbesar memiliki kekuatan 7,9 skala *Ritcher* terdapat dan kekuatan terkecilnya sebesar 1,3 skala *Ritcher* dengan nilai rata-rata magnitudo sebesar 3,85. Nilai masing-masing kuartil satu dan kuartil tiga sebesar 3,3 dan 4,4. Untuk median menghasilkan nilai sebesar 3,9 serta nilai standar deviasi sebesar 0,7897. Wilayah Kalimantan menghasilkan magnitudo gempa terbesar memiliki kekuatan 6,5 skala *Ritcher* terdapat dan kekuatan terkecilnya sebesar 3 skala *Ritcher* dengan nilai rata-rata magnitudo sebesar 4,436. Nilai masing-masing kuartil satu dan kuartil tiga sebesar 3,7 dan 4,9. Untuk median menghasilkan nilai sebesar 4,4 serta nilai standar deviasi sebesar 0,8587. Wilayah Jawa menghasilkan magnitudo gempa terbesar memiliki kekuatan 6,8 skala *Ritcher* terdapat dan kekuatan terkecilnya sebesar 1,6 skala *Ritcher* dengan nilai rata-rata magnitudo sebesar 3,535. Nilai masing-masing kuartil satu dan kuartil tiga sebesar 3 dan 4. Untuk median menghasilkan nilai sebesar 3,5 serta nilai standar deviasi sebesar 0,6937. Wilayah Sumatera menghasilkan magnitudo gempa terbesar memiliki kekuatan 7,7 skala *Ritcher* terdapat dan kekuatan terkecilnya sebesar 1 skala *Ritcher* dengan nilai rata-rata magnitudo sebesar 3,637. Nilai masing-masing kuartil satu dan kuartil tiga sebesar 3,1 dan 4,2. Untuk median menghasilkan nilai sebesar 3,5 serta nilai standar deviasi sebesar 0,7923. Wilayah Halmahera menghasilkan magnitudo gempa terbesar memiliki kekuatan 7,3 skala *Ritcher* terdapat dan kekuatan terkecilnya sebesar 1,1 skala *Ritcher* dengan nilai rata-rata magnitudo sebesar 3,818. Nilai masing-masing kuartil satu dan kuartil tiga sebesar 3,3 dan 4,4. Untuk median menghasilkan nilai sebesar 3,8 serta nilai standar deviasi sebesar 0,7721. Kejadian gempa bumi di Indonesia

yang telah dibagi wilayahnya dapat di visualisasikan dengan histogram pada Gambar 4.4 dibawah ini.



**Gambar 4.4** Histogram Frekuensi Kejadian Wilayah Indonesia

Dalam histogram gambar 4.4 dapat dilihat bahwa kejadian gempa bumi paling sering terjadi pada wilayah pulau Halmahera. Sedangkan wilayah kejadian gempa bumi yang paling rendah masuk kedalam wilayah Kalimantan.

#### 4.2.2 Karakteristik Data Tiap Wilayah Penelitian

Analisis ini berguna untuk dapat melihat karakteristik tiap wilayahnya sehingga menjadi lebih informatif dan mudah dipahami. Berdasarkan hasil pemetaan wilayah, didapatkan 39 informasi untuk setiap gridnya seperti pada Tabel 4.3.

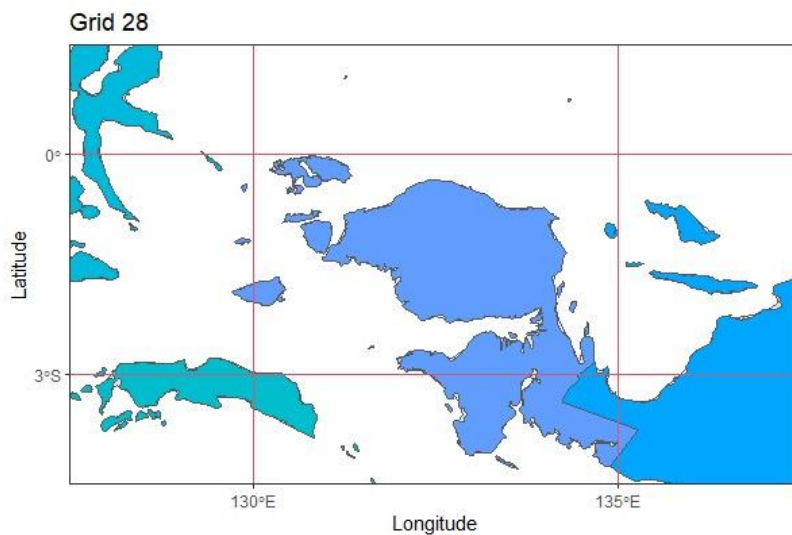
**Tabel 4.3** Karakteristik Data Magnitudo Gempa berdasarkan per Grid Wilayah Penelitian

Grid	Min	Maks	Mean	Grid	Min	Maks	Mean
1	1,5	6,5	3,393	30	1,4	5,9	3,340
3	5,4	6,3	5,850	32	1	7,1	3,626
5	3,1	6	4,230	33	2,4	6,3	3,819
7	1,9	7,2	4,408	34	3,3	6,4	4,687
11	1,2	7,7	3,616	35	1,4	6,6	2,838
12	2,1	6,4	3,487	36	1,6	6,6	3,305
13	3,7	6,4	4,964	37	1,1	6,8	3,309
14	3,5	6,3	4,930	38	2,4	6,3	4,134
15	2,2	6,5	3,727	39	2	7,2	4,073
16	1,1	6,6	3,222	40	1,6	6,2	3,871
17	1,8	7,1	3,865	43	1,4	6,6	3,461
21	2,1	7,7	3,907	44	1,2	6,2	3,221
22	1,9	6,8	3,680	45	1,3	7	3,151
23	3,4	5,9	4,440	46	1	7,3	3,453
24	3,1	6,4	5,033	47	2,1	7,3	4,520

**Tabel 4.3** Karakteristik Data Magnitudo Gempa berdasarkan per Grid Wilayah Penelitian (Lanjutan)

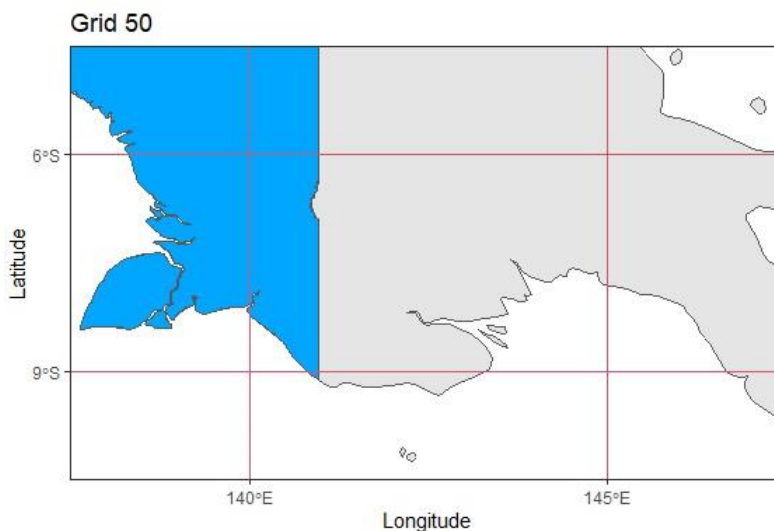
Grid	Min	Maks	Mean	Grid	Min	Maks	Mean
25	1,3	7,5	3,171	48	3,1	7,2	4,595
26	1	6,9	3,354	49	5,7	5,7	5,700
27	1,6	7,2	3,535	50	4,3	5	4,657
28	1,3	7,9	3,755	56	1,8	6,2	3,488
29	2,1	6,9	3,924				

Berdasarkan Tabel 4.3, grid 3 wilayah Kalimantan Barat memiliki rata-rata tertinggi sebesar 5,850 di Indonesia. Sedangkan, grid 32 wilayah Kalimantan Selatan dan Sulawesi Selatan memiliki rata-rata terendah sebesar 2,838 di Indonesia. Nilai maksimal menghasilkan hasil magnitudo tertinggi sebesar 7,9 skala *Ritcher* berada di grid 28 yaitu wilayah Papua Barat pada tanggal 3 Januari 2009. Wilayah penelitian grid 28 dapat dilihat pada Gambar 4.5 dibawah ini.



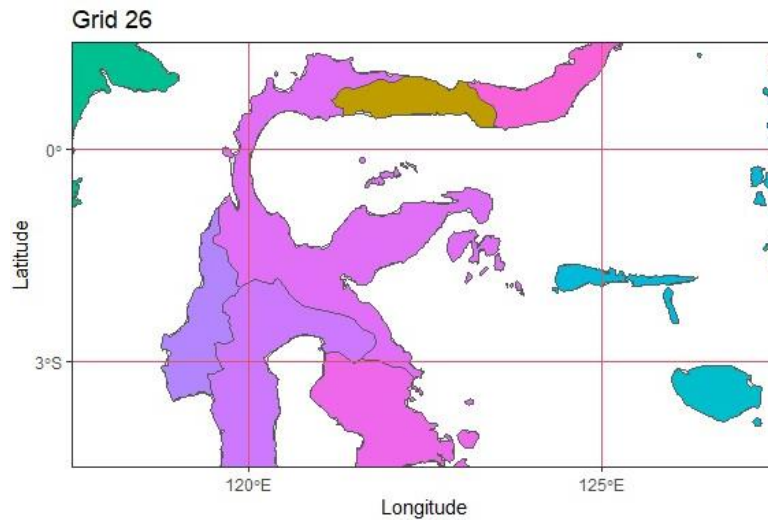
**Gambar 4.5** Wilayah Papua Barat

Magnitudo terendah dalam nilai maksimal sebesar 5 skala *Ritcher* di grid 50 yaitu wilayah Papua. Wilayah penelitian grid 50 dapat dilihat pada Gambar 4.6 dibawah ini.

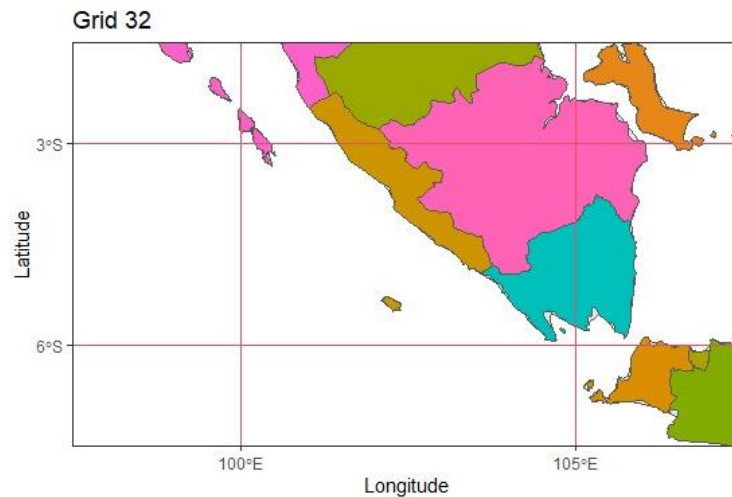


**Gambar 4.6** Wilayah Papua

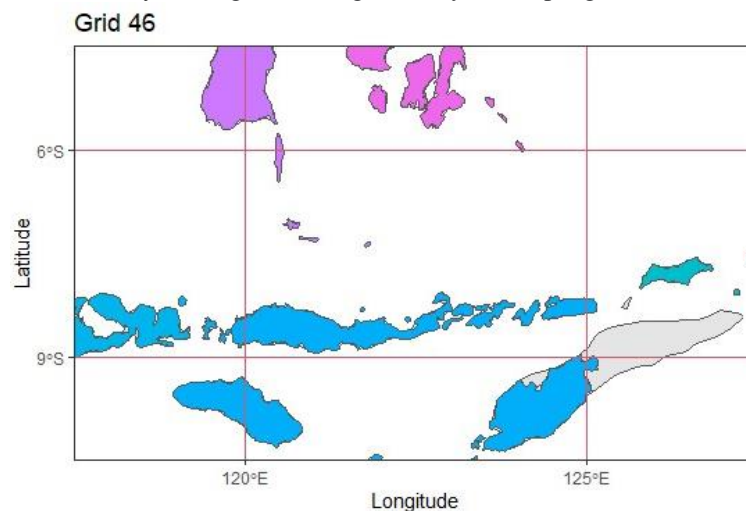
Grid 26, 32, dan 46 memiliki nilai minimal magnitudo terendah sebesar 1 skala *Ritcher* yang merupakan wilayah Sulawesi Tengah, Nusa Tenggara Timur, Bengkulu, dan sebagian Lampung. Gempa dengan magnitudo terendah terjadi pada tanggal 7 Mei, 1 Juli, 4 Juli, 20 September, 24 September, dan 9 November dalam tahun yang sama yaitu tahun 2021. Daerah tersebut dapat divisualisasikan peta wilayahnya pada gambar 4.7 sampai 4.9.



**Gambar 4.7** Wilayah Sulawesi Tengah

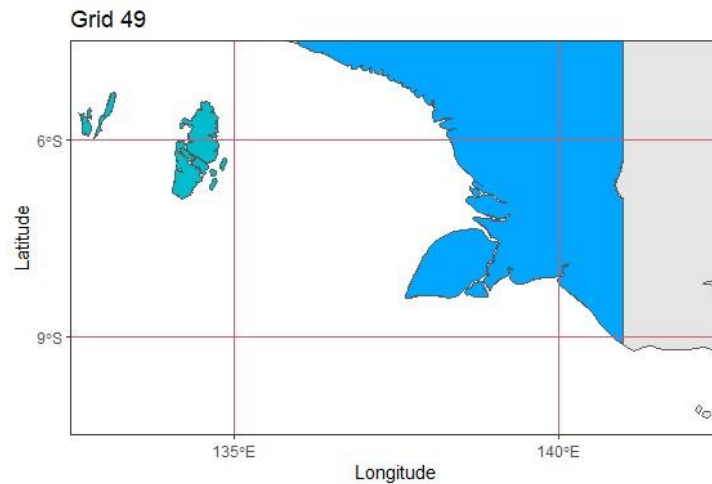


**Gambar 4.8** Wilayah Bengkulu, sebagian wilayah Lampung dan Sumatera Selatan



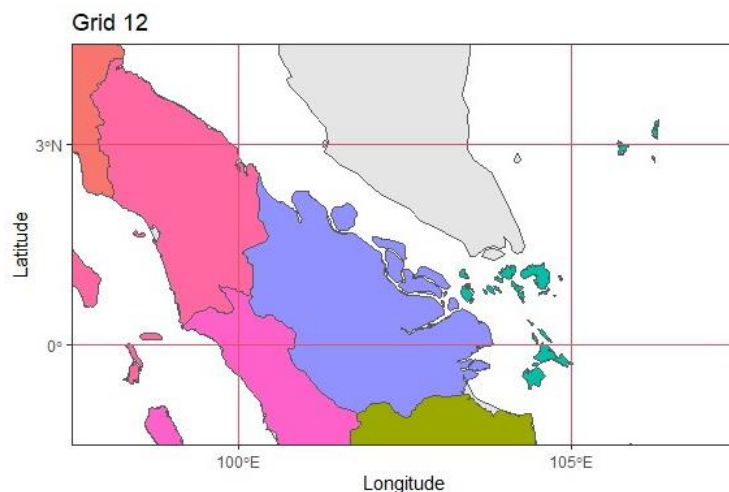
**Gambar 4.9** Wilayah Nusa Tenggara Timur

Sedangkan, Grid 49 memiliki nilai minimal magnitudo tertinggi sebesar 5,7 skala *Ritcher* yang merupakan wilayah Papua. Wilayah penelitian grid 49 dapat dilihat pada Gambar 4.10.



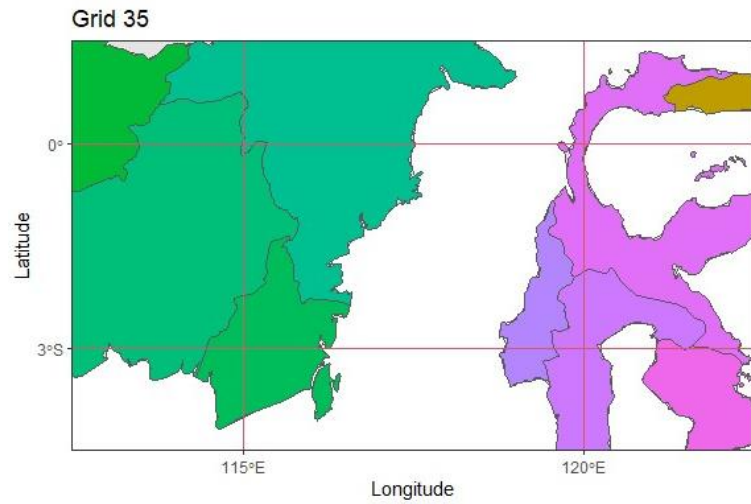
**Gambar 4.10** Wilayah Papua

Dapat juga diambil beberapa contoh seperti grid 12 memiliki nilai minimum sebesar 2,1, maksimal sebesar 6,4, dan rata-rata (*mean*) sebesar 3,487. Grid 35 memiliki nilai minimal sebesar 1,4, maksimal sebesar 6,6, dan 2,838. Hal ini menunjukkan gempa yang terjadi pada grid 12 memiliki magnitudo terkecil 2,1 skala *Ritcher*, terbesarnya 6,4 skala *Ritcher* dengan rata-rata 3,487. Gempa yang terjadi pada grid 35 memiliki magnitudo terkecil 1,4 skala *Ritcher*, terbesarnya 6,6 skala *Ritcher* dengan rata-rata 2,838. Wilayah penelitian 12 dan 35 dapat divisualisasikan pada Gambar 4.11 dan 4.12.

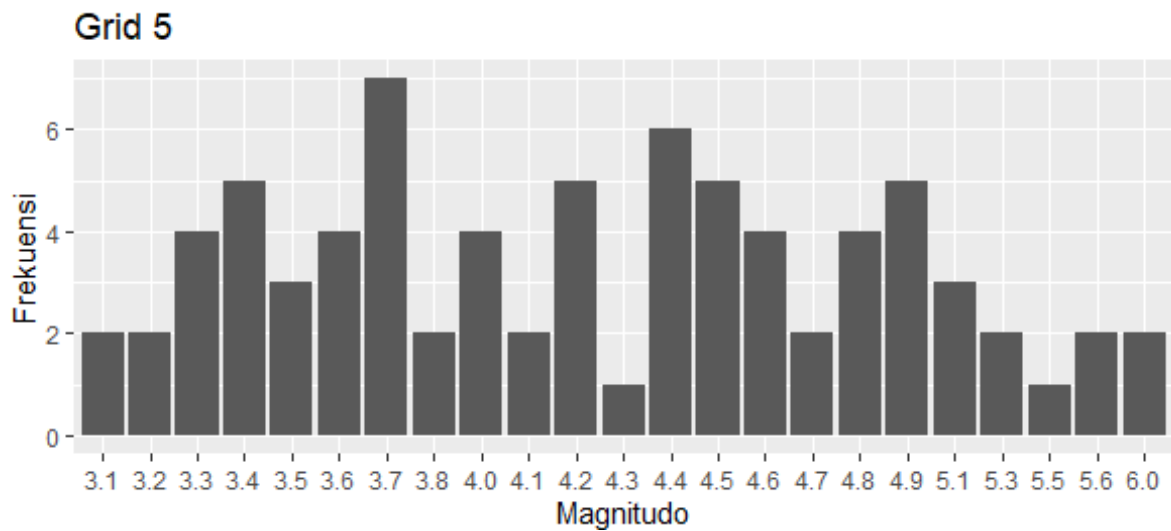


**Gambar 4.11** Wilayah Riau

Tabel 4.4 sampai dengan 4.14 menjelaskan beberapa contoh struktur data yang akan digunakan dalam perhitungan parameter dan sisanya akan berada pada lampiran.  $M$  merupakan nilai magnitudo dengan interval 0,1,  $n$  adalah jumlah gempa bumi dan  $N$  frekuensi kumulatif,  $\text{Log}(N)$  digunakan sebagai variabel dependen dan magnitudo sebagai variabel independen untuk menguji hubungan magnitudo-frekuensi. Serta menjelaskan secara visual frekuensi gempa pada setiap magnitudo yang terjadi di setiap grid wilayah penelitian pada Gambar 4.13 sampai dengan 4.23. Untuk sisa tabel dan histogram akan berada pada lampiran.



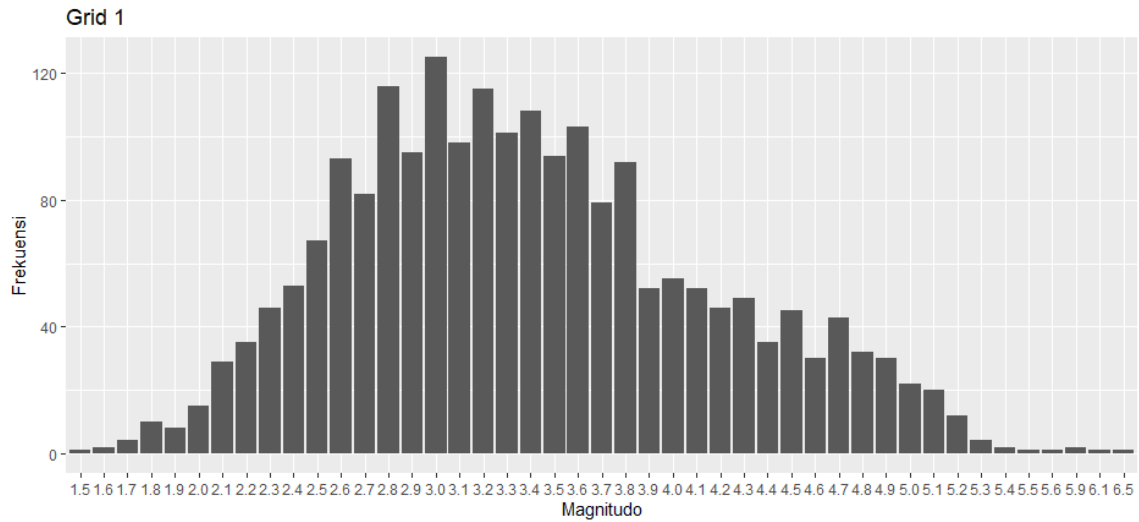
**Gambar 4.12** Wilayah Kalimantan Selatan dan Sulawesi Barat



**Gambar 4.13** Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 5

**Tabel 4.4** Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 5

Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
5	3,1	2	77	1,886	5	4,4	6	36	1,556
	3,2	2	75	1,875		4,5	5	30	1,477
	3,3	4	73	1,863		4,6	4	25	1,397
	3,4	5	69	1,838		4,7	2	21	1,322
	3,5	3	64	1,806		4,8	4	19	1,278
	3,6	4	61	1,785		4,9	5	15	1,176
	3,7	7	57	1,755		5,1	3	10	1
	3,8	2	50	1,698		5,3	2	7	0,845
	4	4	48	1,681		5,5	1	5	0,698
	4,1	2	44	1,643		5,6	2	4	0,602
	4,2	5	42	1,623		6	2	2	0,301
	4,3	1	37	1,568					

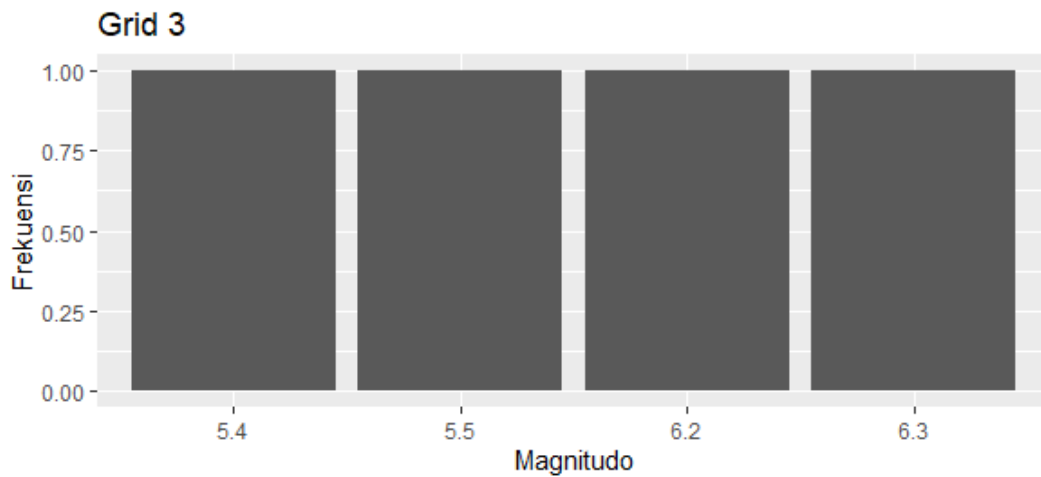


**Gambar 4.14** Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 1

**Tabel 4.5** Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 1

<b>Grid</b>	<b>M</b>	<b>n</b>	<b>N</b>	<b>Log(N)</b>	<b>Grid</b>	<b>M</b>	<b>n</b>	<b>N</b>	<b>Log(N)</b>
	1,5	1	2106	3,323		3,8	92	627	2,797
	1,6	2	2105	3,323		3,9	52	535	2,728
	1,7	4	2103	3,322		4	55	483	2,683
	1,8	10	2099	3,322		4,1	52	428	2,631
	1,9	8	2089	3,319		4,2	46	376	2,575
	2	15	2081	3,318		4,3	49	330	2,518
	2,1	29	2066	3,315		4,4	35	281	2,448
	2,2	35	2037	3,308		4,5	45	246	2,390
	2,3	46	2002	3,301		4,6	30	201	2,303
	2,4	53	1956	3,291		4,7	43	171	2,232
	2,5	67	1903	3,279		4,8	32	128	2,107
1	2,6	93	1836	3,263	1	4,9	30	96	1,982
	2,7	82	1743	3,241		5	22	66	1,819
	2,8	116	1661	3,220		5,1	20	44	1,643
	2,9	95	1545	3,188		5,2	12	24	1,380
	3	125	1450	3,161		5,3	4	12	1,079
	3,1	98	1325	3,122		5,4	2	8	0,903
	3,2	115	1227	3,088		5,5	1	6	0,778
	3,3	101	1112	3,046		5,6	1	5	0,698
	3,4	108	1011	3,004		5,9	2	4	0,602
	3,5	94	903	2,955		6,1	1	2	0,301
	3,6	103	809	2,907		6,5	1	1	0
	3,7	79	706	2,848					

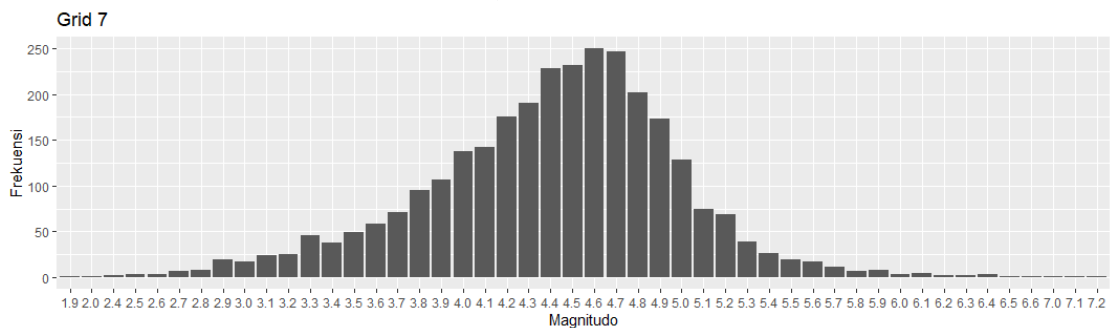




**Gambar 4.15** Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 3

**Tabel 4.6** Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 3

Grid	<i>M</i>	<i>n</i>	<i>N</i>	<i>Log(N)</i>
3	5,4	1	4	0,602
	5,5	1	3	0,477
	6,2	1	2	0,301
	6,3	1	1	0



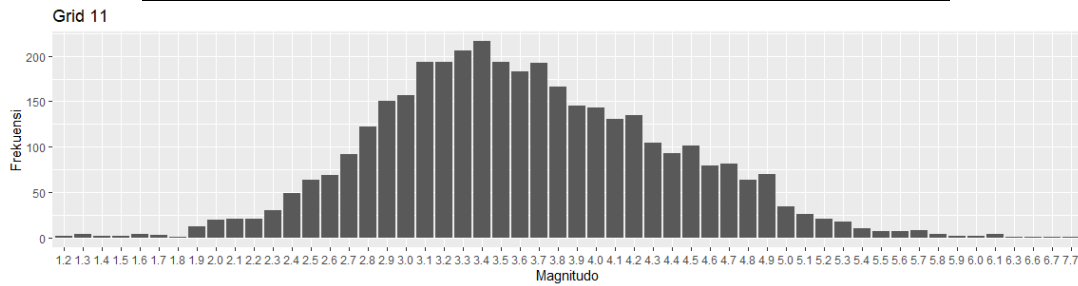
**Gambar 4.16** Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 7

**Tabel 4.7** Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 7

Grid	<i>M</i>	<i>n</i>	<i>N</i>	<i>Log(N)</i>	Grid	<i>M</i>	<i>n</i>	<i>N</i>	<i>Log(N)</i>
7	1,9	1	2976	3,473	7	4,6	250	1293	3,111
	2	1	2975	3,473		4,7	247	1043	3,018
	2,4	2	2974	3,473		4,8	202	796	2,900
	2,5	4	2972	3,473		4,9	173	594	2,773
	2,6	4	2968	3,472		5	129	421	2,624
	2,7	7	2964	3,471		5,1	75	292	2,465
	2,8	8	2957	3,470		5,2	69	217	2,336
	2,9	20	2949	3,469		5,3	39	148	2,170
	3	17	2929	3,466		5,4	26	109	2,037
	3,1	24	2912	3,464		5,5	20	83	1,919
	3,2	25	2888	3,460		5,6	17	63	1,799
	3,3	46	2863	3,456		5,7	11	46	1,662
	3,4	38	2817	3,449		5,8	7	35	1,544

**Tabel 4.7** Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 7 (Lanjutan)

Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
7	3,5	49	2779	3,443	7	5,9	8	28	1,447
	3,6	58	2730	3,436		6	3	20	1,301
	3,7	71	2672	3,426		6,1	5	17	1,230
	3,8	95	2601	3,415		6,2	2	12	1,079
	3,9	107	2506	3,398		6,3	2	10	1
	4	138	2399	3,380		6,4	3	8	0,903
	4,1	142	2261	3,354		6,5	1	5	0,698
	4,2	176	2119	3,326		6,6	1	4	0,602
	4,3	190	1943	3,288		7	1	3	0,477
	4,4	228	1753	3,243		7,1	1	2	0,301
4,5	232	1525	3,183	7,2	1	1	0		



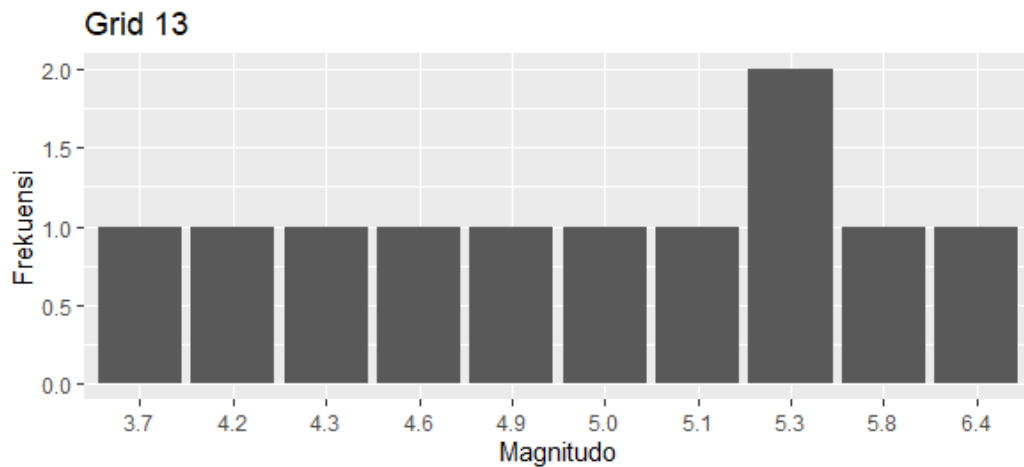
**Gambar 4.17** Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 11

**Tabel 4.8** Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 11

Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
11	1,2	2	3659	3,563	11	4	143	1147	3,059
	1,3	4	3657	3,563		4,1	131	1004	3,001
	1,4	2	3653	3,562		4,2	135	873	2,941
	1,5	2	3651	3,562		4,3	104	738	2,868
	1,6	4	3649	3,562		4,4	93	634	2,802
	1,7	3	3645	3,561		4,5	101	541	2,733
	1,8	1	3642	3,561		4,6	79	440	2,643
	1,9	12	3641	3,561		4,7	81	361	2,557
	2	20	3629	3,559		4,8	64	280	2,447
	2,1	21	3609	3,557		4,9	70	216	2,334
	2,2	21	3588	3,554		5	34	146	2,164
	2,3	30	3567	3,552		5,1	26	112	2,049
	2,4	49	3537	3,548		5,2	21	86	1,934
	2,5	64	3488	3,542		5,3	17	65	1,812
	2,6	69	3424	3,534		5,4	10	48	1,681
	2,7	92	3355	3,525		5,5	7	38	1,579
	2,8	122	3263	3,513		5,6	7	31	1,491
	2,9	150	3141	3,497		5,7	8	24	1,380
	3	157	2991	3,475		5,8	4	16	1,204
	3,1	193	2834	3,452		5,9	2	12	1,079
3,2	193	2641	3,421	6	2	10	1		

**Tabel 4.8** Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 11 (Lanjutan)

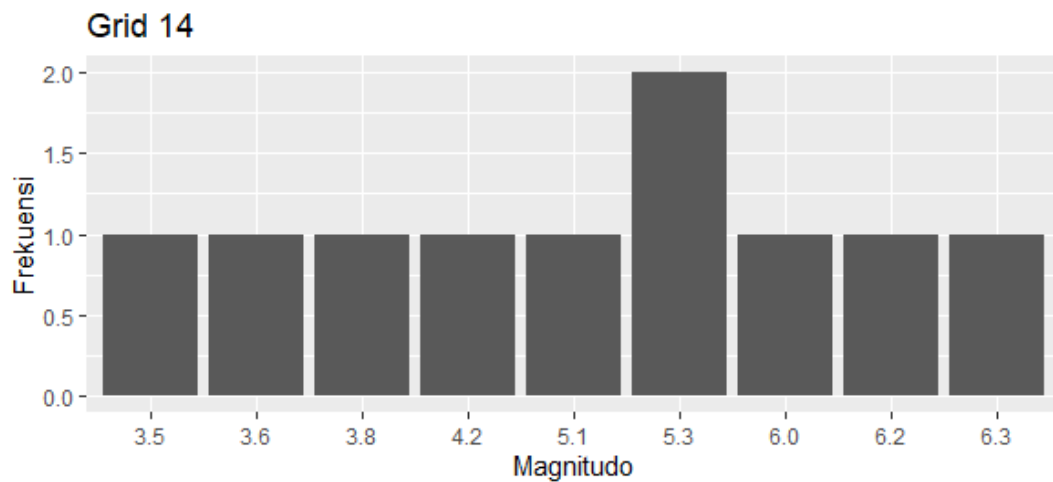
Grid	<i>M</i>	<i>n</i>	<i>N</i>	<i>Log(N)</i>	Grid	<i>M</i>	<i>n</i>	<i>N</i>	<i>Log(N)</i>
11	3,3	206	2448	3,388	11	6,1	4	8	0,903
	3,4	216	2242	3,350		6,3	1	4	0,602
	3,5	193	2026	3,306		6,6	1	3	0,477
	3,6	183	1833	3,263		6,7	1	2	0,301
	3,7	192	1650	3,217		7,7	1	1	0
	3,8	166	1458	3,163					
	3,9	145	1292	3,111					



**Gambar 4.18** Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 13

**Tabel 4.9** Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 11

Grid	<i>M</i>	<i>n</i>	<i>N</i>	<i>Log(N)</i>	Grid	<i>M</i>	<i>n</i>	<i>N</i>	<i>Log(N)</i>
13	3,7	1	11	1,041	13	5,0	1	6	0,778
	4,2	1	10	1		5,1	1	5	0,698
	4,3	1	9	0,954		5,3	2	4	0,602
	4,6	1	8	0,903		5,8	1	2	0,301
	4,9	1	7	0,845		6,4	1	1	0

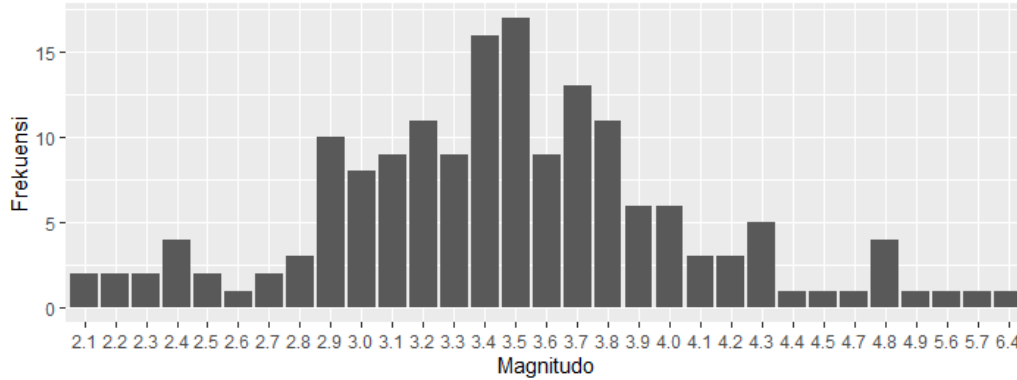


**Gambar 4.19** Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 13

**Tabel 4.10** Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 13

Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
14	3,5	1	10	1	14	5,3	2	5	0,698
	3,6	1	9	0,954		6	1	3	0,477
	3,8	1	8	0,903		6,2	1	2	0,301
	4,2	1	7	0,845		6,3	1	1	0
	5,1	1	6	0,778					

Grid 12

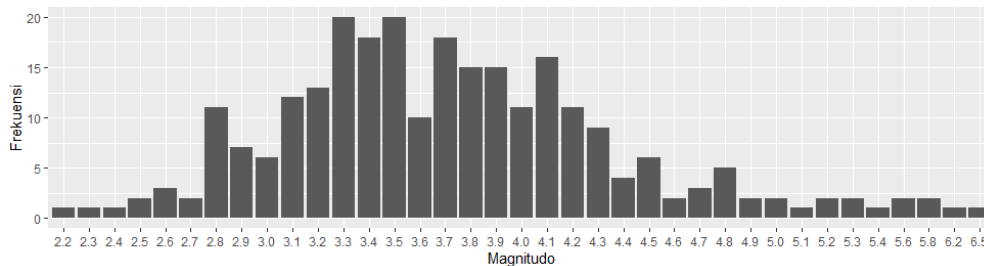


**Gambar 4.20** Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 12

**Tabel 4.11** Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 12

Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
12	2,1	2	165	2,217	12	3,7	13	58	1,763
	2,2	2	163	2,212		3,8	11	45	1,653
	2,3	2	161	2,206		3,9	6	34	1,531
	2,4	4	159	2,201		4	6	28	1,447
	2,5	2	155	2,190		4,1	3	22	1,342
	2,6	1	153	2,184		4,2	3	19	1,278
	2,7	2	152	2,181		4,3	5	16	1,204
	2,8	3	150	2,176		4,4	1	11	1,041
	2,9	10	147	2,167		4,5	1	10	1
	3	8	137	2,136		4,7	1	9	0,954
	3,1	9	129	2,110		4,8	4	8	0,903
	3,2	11	120	2,079		4,9	1	4	0,602
	3,3	9	109	2,037		5,6	1	3	0,477
	3,4	16	100	2		5,7	1	2	0,301
	3,5	17	84	1,924		6,4	1	1	0
	3,6	9	67	1,826					

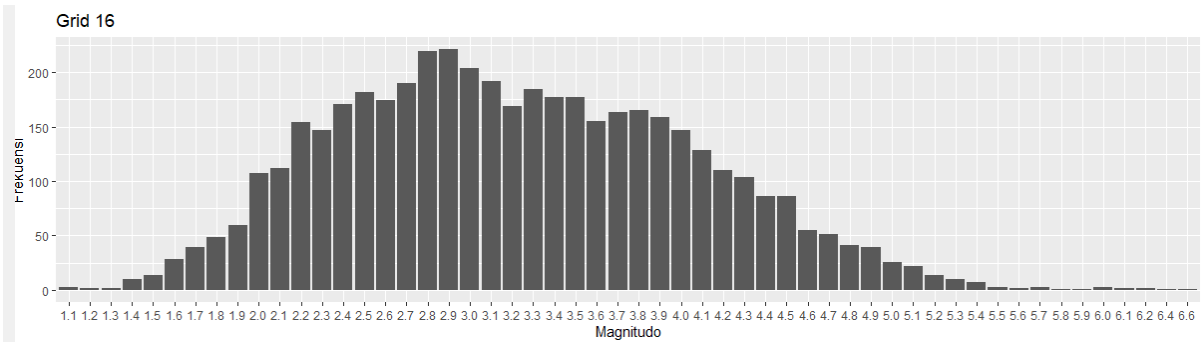
Grid 15



**Gambar 4.21** Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 15

**Tabel 4.12** Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 15

Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
15	2,2	1	258	2,411	12	4,1	16	72	1,857
	2,3	1	257	2,409		4,2	11	56	1,748
	2,4	1	256	2,408		4,3	9	45	1,653
	2,5	2	255	2,406		4,4	4	36	1,556
	2,6	3	253	2,403		4,5	6	32	1,505
	2,7	2	250	2,397		4,6	2	26	1,414
	2,8	11	248	2,394		4,7	3	24	1,380
	2,9	7	237	2,374		4,8	5	21	1,322
	3	6	230	2,361		4,9	2	16	1,204
	3,1	12	224	2,350		5	2	14	1,146
	3,2	13	212	2,326		5,1	1	12	1,079
	3,3	20	199	2,298		5,2	2	11	1,041
	3,4	18	179	2,252		5,3	2	9	0,954
	3,5	20	161	2,206		5,4	1	7	0,845
	3,6	10	141	2,149		5,6	2	6	0,778
	3,7	18	131	2,117		5,8	2	4	0,602
	3,8	15	113	2,053		6,2	1	2	0,301
	3,9	15	98	1,991		6,5	1	1	0
	4	11	83	1,919					



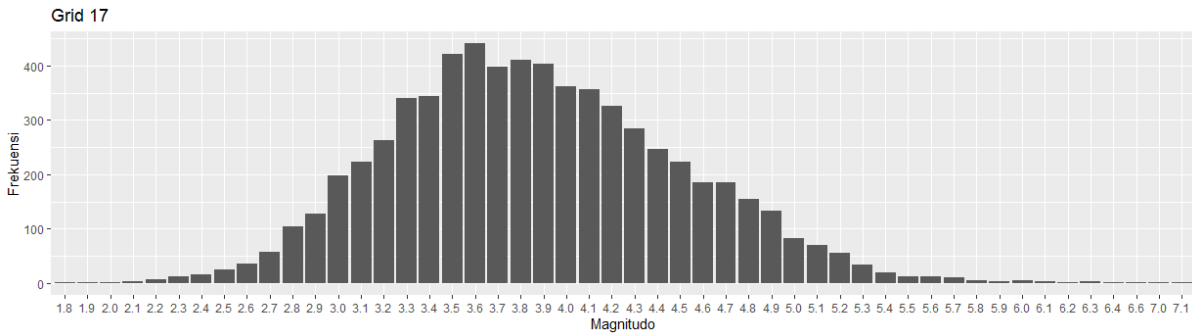
**Gambar 4.22** Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 15

**Tabel 4.13** Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 16

Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
16	1,1	3	4574	3,660	16	3,8	165	1269	3,103
	1,2	2	4571	3,660		3,9	159	1104	3,043
	1,3	2	4569	3,660		4	147	945	2,975
	1,4	10	4567	3,660		4,1	128	798	2,902
	1,5	14	4557	3,659		4,2	110	670	2,826
	1,6	28	4543	3,657		4,3	104	560	2,748
	1,7	39	4515	3,655		4,4	86	456	2,659
	1,8	49	4476	3,651		4,5	86	370	2,568
	1,9	60	4427	3,646		4,6	55	284	2,453
	2	107	4367	3,640		4,7	51	229	2,360
	2,1	112	4260	3,629		4,8	41	178	2,250
	2,2	154	4148	3,618		4,9	39	137	2,137

**Tabel 4.13** Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 16 (Lanjutan)

Grid	<i>M</i>	<i>n</i>	<i>N</i>	<i>Log(N)</i>	Grid	<i>M</i>	<i>n</i>	<i>N</i>	<i>Log(N)</i>
16	2,3	147	3994	3,601	16	5	26	98	1,991
	2,4	171	3847	3,585		5,1	22	72	1,857
	2,5	182	3676	3,565		5,2	14	50	1,699
	2,6	174	3494	3,543		5,3	10	36	1,556
	2,7	190	3320	3,521		5,4	7	26	1,415
	2,8	219	3130	3,496		5,5	3	19	1,279
	2,9	221	2911	3,464		5,6	2	16	1,204
	3	204	2690	3,430		5,7	3	14	1,146
	3,1	192	2486	3,396		5,8	1	11	1,041
	3,2	169	2294	3,361		5,9	1	10	1
	3,3	184	2125	3,327		6	3	9	0,954
	3,4	177	1941	3,288		6,1	2	6	0,778
	3,5	177	1764	3,246		6,2	2	4	0,602
	3,6	155	1587	3,201		6,4	1	2	0,301
3,7	163	1432	3,156	6,6	1	1	0		



**Gambar 4.23** Histogram Frekuensi Wilayah Penelitian 17

**Tabel 4.14** Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 17

Grid	<i>M</i>	<i>n</i>	<i>N</i>	<i>Log(N)</i>	Grid	<i>M</i>	<i>n</i>	<i>N</i>	<i>Log(N)</i>
17	1,8	1	6616	3,821	17	4,3	284	1735	3,239
	1,9	1	6615	3,821		4,4	246	1451	3,162
	2	2	6614	3,820		4,5	224	1205	3,081
	2,1	4	6612	3,820		4,6	185	981	2,992
	2,2	7	6608	3,820		4,7	185	796	2,901
	2,3	12	6601	3,820		4,8	154	611	2,786
	2,4	15	6589	3,819		4,9	133	457	2,660
	2,5	24	6574	3,818		5	83	324	2,511
	2,6	35	6550	3,816		5,1	70	241	2,382
	2,7	58	6515	3,814		5,2	55	171	2,233
	2,8	105	6457	3,810		5,3	34	116	2,064
	2,9	127	6352	3,803		5,4	20	82	1,914
	3	198	6225	3,794		5,5	12	62	1,792
	3,1	224	6027	3,780		5,6	12	50	1,699
3,2	263	5803	3,764	5,7	11	38	1,580		
3,3	340	5540	3,744	5,8	5	27	1,431		

**Tabel 4.14** Data Akhir Magnitudo Gempa Bumi Wilayah Penelitian 17 (Lanjutan)

Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
	3,4	344	5200	3,716		5,9	3	22	1,342
	3,5	421	4856	3,686		6	5	19	1,279
	3,6	441	4435	3,647		6,1	4	14	1,146
	3,7	399	3994	3,601		6,2	2	10	1,000
17	3,8	411	3595	3,556	17	6,3	3	8	0,903
	3,9	404	3184	3,503		6,4	1	5	0,699
	4	363	2780	3,444		6,6	2	4	0,602
	4,1	356	2417	3,383		7	1	2	0,301
	4,2	326	2061	3,314		7,1	1	1	0,000

### 4.3 Menghitung Nilai Parameter *Gutenberg-Ritcher*

Perhitungan estimasi parameter  $a$  dan  $b$  dengan menggunakan metode *Least Square* pada setiap wilayah grid penelitian diperlukan agar mendapatkan persamaan *linear*. Nilai  $a$  sendiri merupakan parameter seismik yang besarnya bergantung pada banyaknya kejadian dan aktivitas daerah pengamatan gempa bumi. Nilai  $b$  merupakan parameter tektonik yang menunjukkan jumlah relatif dari getaran kecil maupun besar gempa bumi (Wibowo dkk, 2017). Berikut Tabel 4.15 merupakan hasil dari perhitungan estimasi parameter.

**Tabel 4.15** Hasil dari Estimasi Parameter Magnitudo

Grid	Parameter	Grid	Parameter	Grid	Parameter
1	$a$ 4,914	23	$a$ 2,517	37	$a$ 4,859
	$b$ -0,650		$b$ -0,384		$b$ -0,593
3	$a$ 3,338	24	$a$ 2,644	38	$a$ 5,567
	$b$ -0,511		$b$ -0,350		$b$ -0,745
5	$a$ 3,721	25	$a$ 4,904	39	$a$ 4,628
	$b$ -0,531		$b$ -0,653		$b$ -0,600
7	$a$ 5,718	26	$a$ 5,383	40	$a$ 4,250
	$b$ -0,700		$b$ -0,674		$b$ -0,568
11	$a$ 4,983	27	$a$ 5,532	43	$a$ 5,454
	$b$ -0,596		$b$ -0,727		$b$ -0,715
12	$a$ 3,758	28	$a$ 4,585	44	$a$ 4,858
	$b$ -0,586		$b$ -0,539		$b$ -0,657
13	$a$ 2,702	29	$a$ 5,269	45	$a$ 5,530
	$b$ -0,403		$b$ -0,688		$b$ -0,717
14	$a$ 1,980	30	$a$ 4,157	46	$a$ 4,741
	$b$ -0,269		$b$ -0,557		$b$ -0,582
15	$a$ 4,038	32	$a$ 4,613	47	$a$ 5,497
	$b$ -0,574		$b$ -0,527		$b$ -0,672
16	$a$ 5,058	33	$a$ 3,438	48	$a$ 6,266
	$b$ -0,637		$b$ -0,477		$b$ -0,864
17	$a$ 5,916	34	$a$ 3,697	49	$a$ -
	$b$ -0,737		$b$ -0,523		$b$ -
21	$a$ 4,818	35	$a$ 3,637	50	$a$ 5,823
	$b$ -0,611		$b$ -0,543		$b$ -1,136
22	$a$ 4,856	36	$a$ 4,212	56	$a$ 5,111
	$b$ -0,665		$b$ -0,596		$b$ -0,697

Dari nilai estimasi parameter yang telah dihitung selanjutnya dapat menghasilkan persamaan *linear* untuk setiap grid wilayah penelitian berupa pengaruh hubungan magnitudo terhadap frekuensi gempa bumi. Tahapan pemodelan Gutenberg-Ritcher dapat menggunakan persamaan.

$$y = \log N = a - bM$$

Model gempa bumi berdasarkan *Gutenberg-Ritcher* kemudian disusun seperti pada Tabel 4.16.

**Tabel 4.16** Hasil Pemodelan *Gutenberg-Ritcher*

<b>Grid</b>	<b>Model Gutenberg-Ritcher</b>	<b>Grid</b>	<b>Model Gutenberg-Ritcher</b>
1	$\text{Log}(N) = 4,914 - 0,650 M$	30	$\text{Log}(N) = 4,157 - 0,557 M$
3	$\text{Log}(N) = 3,338 - 0,511 M$	32	$\text{Log}(N) = 4,613 - 0,527 M$
5	$\text{Log}(N) = 3,721 - 0,531 M$	33	$\text{Log}(N) = 3,438 - 0,477 M$
7	$\text{Log}(N) = 5,718 - 0,700 M$	34	$\text{Log}(N) = 3,697 - 0,523 M$
11	$\text{Log}(N) = 4,983 - 0,596 M$	35	$\text{Log}(N) = 3,637 - 0,543 M$
12	$\text{Log}(N) = 3,758 - 0,586 M$	36	$\text{Log}(N) = 4,212 - 0,596 M$
13	$\text{Log}(N) = 2,702 - 0,403 M$	37	$\text{Log}(N) = 4,859 - 0,593 M$
14	$\text{Log}(N) = 1,981 - 0,269 M$	38	$\text{Log}(N) = 5,567 - 0,745 M$
15	$\text{Log}(N) = 4,038 - 0,574 M$	39	$\text{Log}(N) = 4,628 - 0,600 M$
16	$\text{Log}(N) = 5,058 - 0,637 M$	40	$\text{Log}(N) = 4,250 - 0,568 M$
17	$\text{Log}(N) = 5,916 - 0,737 M$	43	$\text{Log}(N) = 5,454 - 0,715 M$
21	$\text{Log}(N) = 4,818 - 0,611 M$	44	$\text{Log}(N) = 4,858 - 0,657 M$
22	$\text{Log}(N) = 4,856 - 0,665 M$	45	$\text{Log}(N) = 5,531 - 0,717 M$
23	$\text{Log}(N) = 2,517 - 0,384 M$	46	$\text{Log}(N) = 4,741 - 0,582 M$
24	$\text{Log}(N) = 2,644 - 0,351 M$	47	$\text{Log}(N) = 5,497 - 0,672 M$
25	$\text{Log}(N) = 4,904 - 0,653 M$	48	$\text{Log}(N) = 6,266 - 0,864 M$
26	$\text{Log}(N) = 5,383 - 0,674 M$	49	-
27	$\text{Log}(N) = 5,532 - 0,727 M$	50	$\text{Log}(N) = 5,823 - 1,136 M$
28	$\text{Log}(N) = 4,585 - 0,539 M$	56	$\text{Log}(N) = 5,111 - 0,697 M$
29	$\text{Log}(N) = 5,269 - 0,688 M$		

Berdasarkan Tabel 4.16, dapat dilihat bahwa magnitudo yang terjadi memiliki pengaruh negatif terhadap frekuensi kejadian gempa bumi pada semua wilayah grid penelitian. Sebagai contoh, pada grid 5 memperoleh persamaan linear  $\text{Log } N = 3,721 - 0,531 M$ . Hal ini menunjukkan apabila magnitudo gempa bumi yang terjadi pada grid 5 mengalami kenaikan sebesar satu satuan, maka nilai log frekuensi gempa bumi akan berkurang sebesar 0,531. Selanjutnya, apabila grid 5 memiliki magnitudo yang bernilai nol, maka besar nilai log frekuensi gempa bumi atau  $\text{Log } N$  sebesar 3,721 satuan. Pada grid 35 memperoleh persamaan linear  $\text{Log } N = 3,637 - 0,543 M$  dapat menunjukan apabila magnitudo gempa bumi yang terjadi di grid 35 mengalami kenaikan sebesar satu satuan, maka nilai log frekuensi gempa bumi akan berkurang sebesar 0,543 sedangkan apabila grid 35 memiliki magnitudo yang bernilai nol, maka besar nilai log frekuensi gempa bumi atau  $\text{Log } N$  sebesar 3,637 satuan. Demikian pula untuk hubungan antara magnitudo dengan frekuensi gempa bumi pada setiap grid wilayah lainnya. Dapat juga dimisalkan menghitung frekuensi gempa bumi dengan magnitudo terkecil atau  $M_{max}$  dan  $\bar{M}$  dalam wilayah grid penelitian dengan skala *Richter* seperti pada Tabel 4.17. Tabel 4.17 dapat menghasilkan perbandingan, kejadian gempa bumi dengan perhitungan magnitudo rata-rata atau  $\bar{M}$  menghasilkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan magnitudo terbesar atau  $M_{max}$ . Artinya semakin kecil magnitudo yang terjadi di wilayah grid penelitian, maka semakin sering terjadi gempa bumi.



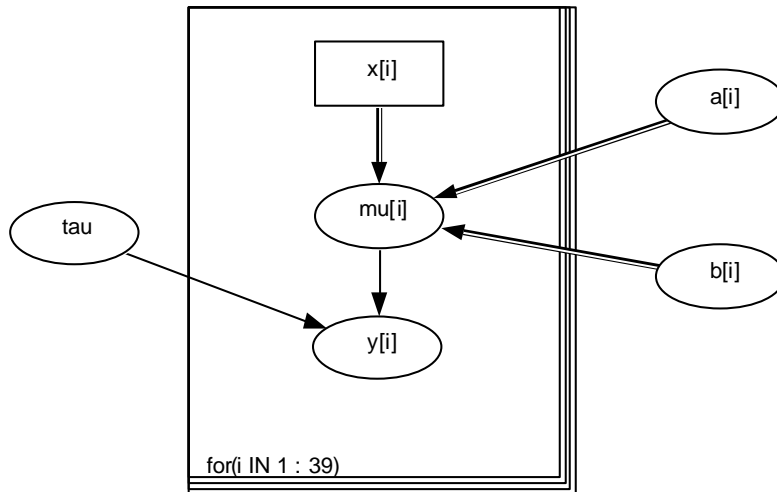
**Tabel 4.17** Perhitungan Frekuensi Gempa Bumi dengan  $M_0$  dan  $\bar{M}$  Gutenberg-Richter

Grid	$M_{max}$		$\bar{M}$	
	$y = \text{Log}(N)$	$N$	$y = \text{Log}(N)$	$N$
1	$4,914 - 0,650 (6,5) = 2,637$	433,511	$4,914 - 0,650 (3,4) = 4,385$	24288,46
3	$3,338 - 0,511 (6,3) = 0,119$	1,314	$3,338 - 0,511 (5,8) = 0,374$	2,367
5	$3,721 - 0,531 (6) = 0,535$	3,427	$3,721 - 0,531 (4,2) = 1,491$	30,959
7	$5,718 - 0,700 (7,2) = 0,678$	4,764	$5,718 - 0,700 (4,4) = 2,638$	434,510
11	$4,983 - 0,596 (7,7) = 0,394$	2,476	$4,983 - 0,596 (3,6) = 2,837$	687,701
12	$3,758 - 0,586 (6,4) = 0,008$	1,017	$3,758 - 0,586 (3,4) = 1,766$	58,290
13	$2,702 - 0,403 (6,4) = 0,123$	1,326	$2,702 - 0,403 (4,9) = 0,727$	5,337
14	$1,981 - 0,269 (6,3) = 0,285$	1,928	$1,981 - 0,269 (4,9) = 0,662$	4,590
15	$4,038 - 0,574 (6,5) = 0,307$	2,027	$4,038 - 0,574 (3,7) = 1,914$	82,072
16	$5,058 - 0,637 (6,6) = 0,854$	7,141	$5,058 - 0,637 (3,2) = 3,019$	1046,165
17	$5,916 - 0,737 (7,1) = 6,833$	4,822	$5,916 - 0,737 (3,8) = 3,115$	1304,368
21	$4,818 - 0,611 (7,7) = 0,113$	1,298	$4,818 - 0,611 (3,9) = 2,435$	272,332
22	$4,856 - 0,665 (6,8) = 0,334$	2,157	$4,856 - 0,665 (3,6) = 2,462$	289,7344
23	$2,517 - 0,384 (5,9) = 0,251$	1,784	$2,517 - 0,384 (4,4) = 0,827$	6,720
24	$2,644 - 0,351 (6,4) = 0,404$	2,535	$2,644 - 0,351 (5) = 0,894$	7,834
25	$4,904 - 0,653 (7,5) = 0,007$	1,015	$4,904 - 0,653 (3,1) = 2,879$	758,053
26	$5,383 - 0,674 (6,9) = 0,732$	5,400	$5,383 - 0,674 (3,3) = 3,159$	1441,451
27	$5,532 - 0,727 (7,2) = 0,298$	1,984	$5,532 - 0,727 (3,5) = 2,987$	971,628
28	$4,585 - 0,539 (7,9) = 0,327$	2,122	$4,585 - 0,539 (3,7) = 2,591$	389,672
29	$5,269 - 0,688 (6,9) = 0,522$	3,325	$5,269 - 0,688 (3,9) = 2,586$	385,300
30	$4,157 - 0,557 (5,9) = 0,871$	7,425	$4,157 - 0,557 (3,3) = 2,319$	208,401
32	$4,613 - 0,527 (7,1) = 0,871$	7,435	$4,613 - 0,527 (3,6) = 2,716$	519,756
33	$3,438 - 0,477 (6,3) = 0,433$	2,709	$3,438 - 0,477 (3,8) = 1,625$	42,208
34	$3,697 - 0,523 (6,4) = 0,349$	2,237	$3,697 - 0,523 (4,6) = 1,291$	19,552
35	$3,637 - 0,543 (6,6) = 0,053$	1,130	$3,637 - 0,543 (2,8) = 2,117$	130,797
36	$4,212 - 0,596 (6,6) = 0,278$	1,898	$4,212 - 0,596 (3,3) = 2,245$	175,873
37	$4,859 - 0,593 (6,8) = 0,827$	6,708	$4,859 - 0,593 (3,3) = 2,902$	798,178
38	$5,567 - 0,745 (6,3) = 0,874$	7,473	$5,567 - 0,745 (4,1) = 2,512$	325,461
39	$4,628 - 0,600 (7,2) = 0,308$	2,032	$4,628 - 0,600 (4) = 2,228$	169,041
40	$4,250 - 0,568 (6,2) = 0,728$	5,350	$4,250 - 0,568 (3,8) = 2,092$	123,481
44	$4,858 - 0,657 (6,2) = 0,785$	6,089	$4,858 - 0,657 (3,2) = 2,756$	569,639
45	$5,531 - 0,717 (7) = 0,511$	3,243	$5,531 - 0,717 (3,1) = 3,307$	2029,084
46	$4,741 - 0,582 (7,3) = 0,492$	3,107	$4,741 - 0,582 (3,4) = 2,762$	578,362
47	$5,497 - 0,672 (7,3) = 0,591$	3,903	$5,497 - 0,672 (4,5) = 2,473$	297,166
48	$6,266 - 0,864 (7,2) = 0,045$	1,109	$6,266 - 0,864 (4,5) = 2,378$	238,781
49	-	-	-	-
50	$5,823 - 1,136 (5) = 0,143$	1,389	$5,823 - 1,136 (4,6) = 0,597$	3,957
56	$5,111 - 0,697 (6,2) = 0,789$	6,160	$5,111 - 0,697 (3,4) = 2,741$	551,061

Seperti pada grid 28 atau wilayah Papua Barat, kejadian gempa bumi dengan magnitudo  $\bar{M}$  sebesar 3,7 terjadi sekitar 390 kali dalam 14 tahun. Sedangkan kejadian gempa bumi dengan magnitudo  $M_{max}$  sebesar 7,9 terjadi sekitar 2 kali dalam 14 tahun. Dalam grid 49, model tidak muncul dikarenakan dalam wilayah tersebut hanya terjadi satu kali gempa dalam 14 tahun periode penelitian.

#### 4.4 Menghitung Nilai Parameter Bayesian

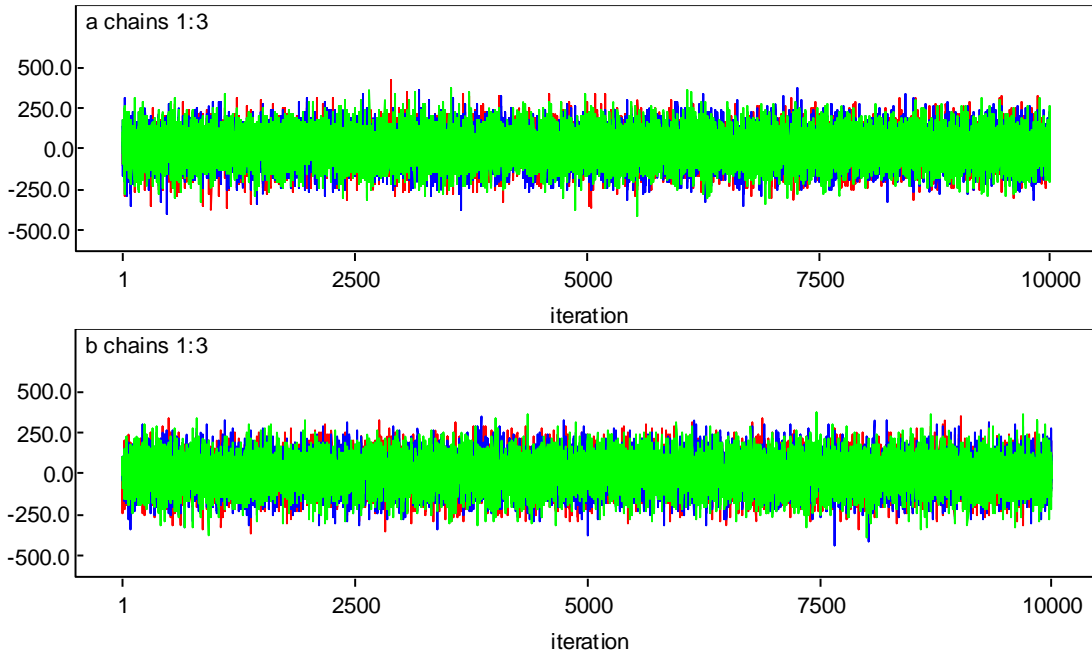
Pemodelan Bayesian dihitung menggunakan nilai *Prior* yang berasal dari hasil nilai parameter *Gutenberg-Richter* pada Tabel 4.15. Informasi *Posterior* didapatkan melalui pendekatan *Markov Chain Monte Carlo* dengan *gibbs sampling* untuk membangkitkan. Langkah pertama yang dilakukan yaitu membentuk struktur pemodelan dalam doodle dengan node atau parameter yang sudah sesuai dengan nama variabel dalam model. Fungsi dari doodle sendiri untuk mempresentasikan variabel dari model yang dihasilkan nantinya. Bentuk *doodle Bayesian* untuk memodelkan hubungan frekuensi dan magnitudo ditunjukkan pada Gambar 4.24.



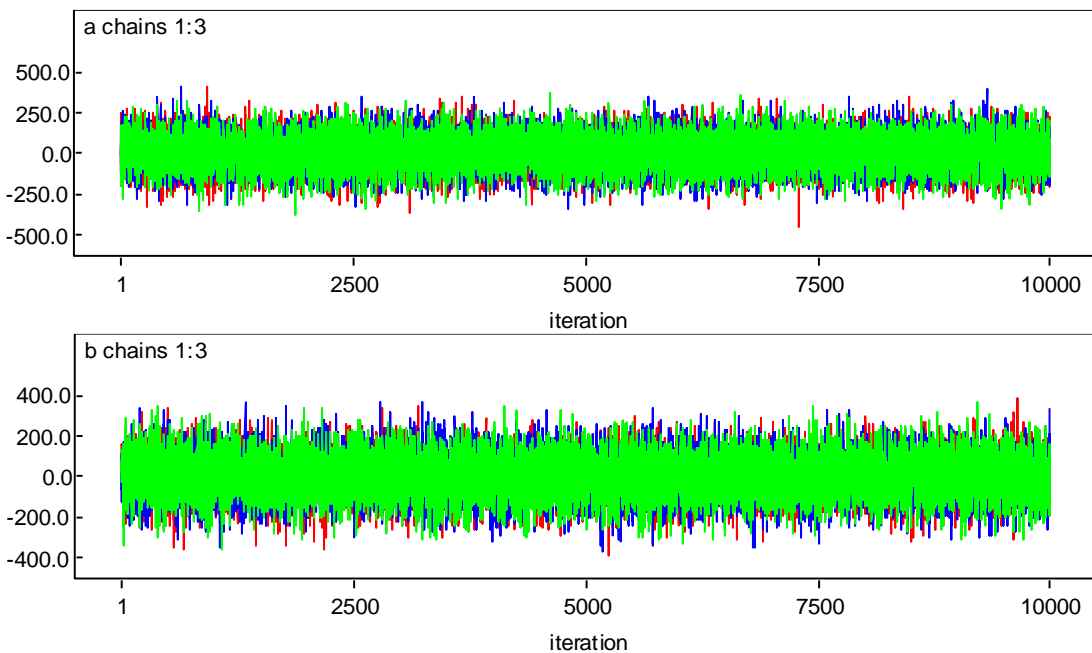
Gambar 4.24 Doodle Parameter Bayesian

Gambar 4.24 menunjukkan bahwa  $x[i]$  merupakan data yang diperlukan untuk mencari nilai parameter untuk data ke- $i$ . Nilai  $mu[i]$  diasosiasikan ke dalam node  $y[i]$  yang berguna untuk mengubah nilai parameter menjadi berdistribusi normal pada setiap hasil model. Nilai  $mu[i]$  berasal dari nilai parameter  $a$  dan  $b$ . Panah dari doodle memiliki fungsi menunjukkan asosiasi. Node  $a[i]$  dan  $b[i]$  menunjukkan parameter untuk grid ke- $i$  dari parameter *Gutenberg-Richter*. Tau merupakan varians dari  $y[i]$ , dengan menggunakan nilai lebih dari 1 karena hasil varians tidak mungkin minus sedangkan jika menggunakan 0 tidak memungkinkan karena hasilnya akan tidak terdefinisi.

Sebelum melakukan analisis Bayesian, terlebih dahulu melihat kondisi distribusi *Posterior* sudah memenuhi asumsi parameternya yang harus stasioner, konvergen, dan berdistribusi normal. Jika semua asumsi terpenuhi selanjutnya dapat melanjutkan ke tahap analisis. Dengan menggunakan software *WinBUGS*, analisis ini menggunakan 3 *chain* dan *update* sebanyak 10.000 iterasi. *Time series plot* dari *history chain* berguna untuk mendeteksi bahwa simulasi dari pembentukan parameter *Posterior* sudah *stationer*. Saat melakukan analisis, nilai awal pada rantai *Markov* yang tidak *stationer* akan dilakukan proses *burn in*. Arti dari proses *burn in* adalah proses menghilangkan bagian awal dari rantai karena belum menunjukkan perkiraan sampel yang akan menuju pada distribusi tertentu. Seperti Gambar dibawah ini, kedua parameter ( $a$  dan  $b$ ) dari beberapa grid wilayah penelitian dapat dikatakan bahwa distribusi *Posterior* sudah stasioner karena tidak terjadi kenaikan atau penurunan secara tajam pada data. Gambar 4.25 dan Gambar 4.26 hanya menampilkan *history chain* dari parameter pada grid 5 dan 35. Hal ini dikarenakan jika menampilkan semua hasil grid tidak memungkinkan karena terlalu banyak, maka dari itu diambil dua yang akan dijelaskan. Untuk hasil *history chain* grid lainnya disediakan pada lampiran. Parameter tersebut dikatakan konvergen jika hasil yang didapatkan dari statistik *Gelman-Rubin* memiliki nilai mendekati 1. Konsep dasar dari *Gelman-Rubin* adalah menilai konvergensi dari beberapa rantai dari nilai awal yang *over-dispersed*.

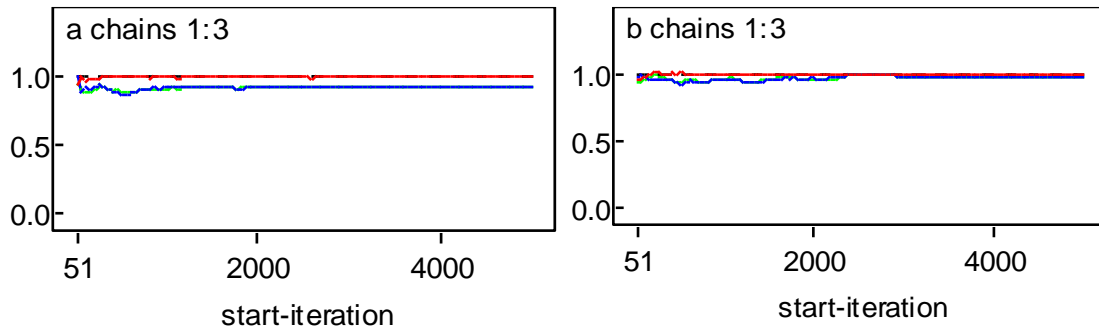


**Gambar 4.25** Time Series Plot dari Parameter  $a$  dan  $b$  dalam Grid 5

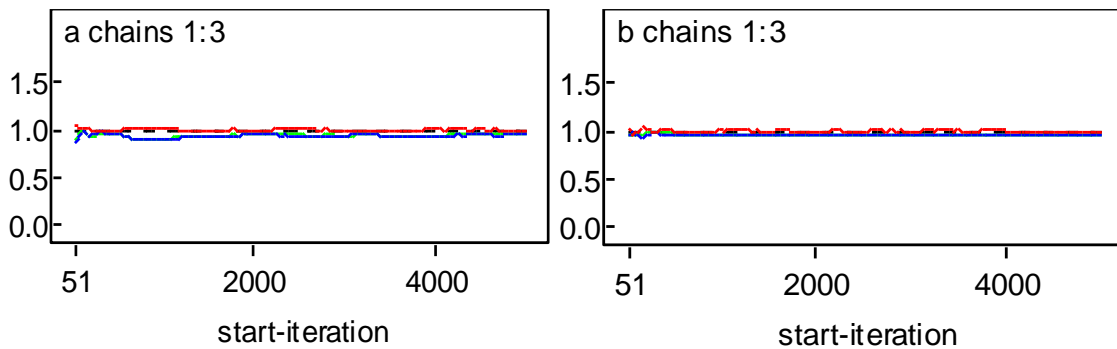


**Gambar 4.26** Time Series Plot dari Parameter  $a$  dan  $b$  dalam Grid 35

Perhitungan rasio  $R=B/W$  dari pooled to average interval harus lebih besar dari 1 jika nilai awal *over-dispersed* secara tepat. Dengan keterangan jumlah rantai yang dihasilkan dilambangkan  $M$  dan panjang setiap rantai yaitu  $2T$  dan  $W$  merupakan lebar rata-rata interval di seluruh  $M$  rantai. Lebar  $B$  diperoleh dari empirical credible interval dengan rumus  $100(1-a)\%$  yang kemudian dihitung berdasarkan semua sampel  $MT$  yang *pooled together*. Nilai tersebut akan juga cenderung mendekati 1 ketika konvergensi semakin dekat (Lunn dkk, 2012). Dalam plot garis merah tampak persis mendekati 1 yang dimana dapat membuktikan bahwa parameter sudah konvergen. Berikut Gambar 4.27 dan Gambar 4.28 sebagian dari hasil statistik *Gelman-Rubin* dan sisanya dapat dilihat dalam lampiran.

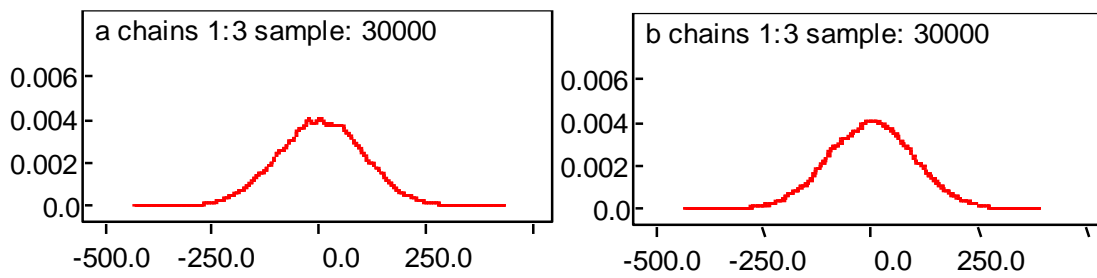


**Gambar 4.27** Grafik *Gelman-Rubin* dari Parameter  $a$  dan  $b$  di Grid 5

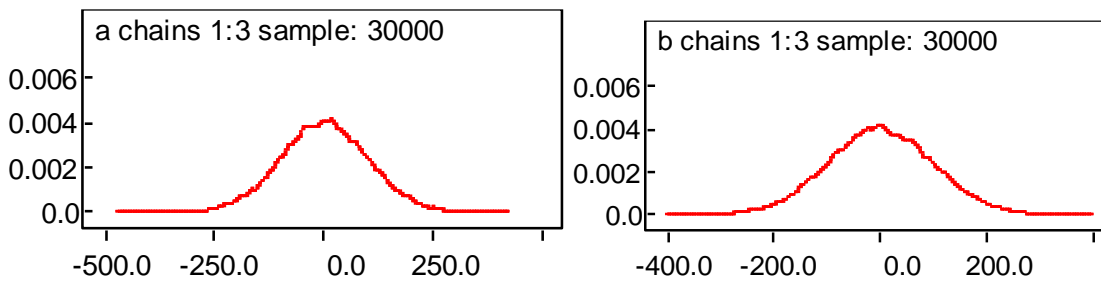


**Gambar 4.28** Grafik *Gelman-Rubin* dari Parameter  $a$  dan  $b$  di Grid 35

*Prior* pada Bayesian ini merupakan distribusi normal dengan parameter yang diperoleh dari hasil estimasi *Gutenberg-Richter* dimana menggunakan rumus regresi linear sehingga sesuai dengan teori. Distribusi normal salah satu distribusi yang paling penting dalam statistika, dimana bentuk kurva dari distribusi normal yang menyerupai bentuk lonceng. Hasil sebagian dari distribusi pada parameter dalam pemodelan *Bayes* dapat dilihat pada Gambar 4.29 dan 4.30 serta untuk sisanya berada pada lampiran.



**Gambar 4.29** Distribusi Normal dari Parameter  $a$  dan  $b$  di Grid 5



**Gambar 4.30** Distribusi Normal dari Parameter  $a$  dan  $b$  di Grid 35

Gambar 4.29 dan 4.30 menunjukkan bahwa secara keluruhan parameter yang digunakan telah berdistribusi normal dimana hanya memiliki satu puncak yang melambangkan nilai mean

telah konvergen atau berpusat ke suatu titik. Titik tersebut didapatkan dari nilai estimasi parameter yang didapatkan dengan metode sebelumnya.

Adapun hasil parameter *Bayesian* dengan menggunakan *Markov Chain Monte Carlo* terlihat dalam Tabel 4.18.

**Tabel 4.18** Hasil Estimasi Parameter *Bayesian*

Grid	Parameter	Mean	Standar Deviasi	MC error	2.5%	97.5%
1	<i>a</i>	4,918	100,3	0,554	-188,3	203,2
	<i>b</i>	-0,651	99,63	0,566	-195,7	196
3	<i>a</i>	3,273	99,79	0,555	-189,5	203,2
	<i>b</i>	-0,501	99,46	0,596	-194	197,4
5	<i>a</i>	3,716	100,3	0,546	-191,8	201,6
	<i>b</i>	-0,531	99,81	0,587	-194,4	198,2
7	<i>a</i>	5,711	99,55	0,542	-186,9	204,9
	<i>b</i>	-0,699	99,61	0,589	-196,3	196,3
11	<i>a</i>	4,986	99,9	0,589	-189,9	201,6
	<i>b</i>	-0,596	99,48	0,569	-194,7	195,8
12	<i>a</i>	3,754	100,3	0,549	-188,2	204,1
	<i>b</i>	-0,585	99,32	0,554	-191,4	197
13	<i>a</i>	2,696	99,58	0,643	-187,7	201,4
	<i>b</i>	-0,402	100,1	0,561	-194,3	197,3
14	<i>a</i>	1,968	100,6	0,548	-189,4	206,8
	<i>b</i>	-0,267	99,74	0,61	-196,2	196
15	<i>a</i>	4,038	100,2	0,561	-189,4	201,6
	<i>b</i>	-0,574	99,36	0,562	-194	195,9
16	<i>a</i>	5,059	99,9	0,589	-190,1	201,4
	<i>b</i>	-0,638	99,48	0,569	-194,8	195,8
17	<i>a</i>	5,911	99,17	0,579	-187,8	199,2
	<i>b</i>	-0,736	100,4	0,576	-196,7	197,1
21	<i>a</i>	4,817	99,63	0,579	-188,1	202,5
	<i>b</i>	-0,611	99,35	0,588	-193,4	194,9
22	<i>a</i>	4,857	100,1	0,605	-189,6	201,2
	<i>b</i>	-0,664	99,89	0,601	-197	196,8
23	<i>a</i>	2,514	99,86	0,558	-189,3	203,6
	<i>b</i>	-0,383	100	0,575	-194	197,5
24	<i>a</i>	2,643	99,63	0,552	-185,5	204,5
	<i>b</i>	-0,351	99,69	0,546	-194,5	195,3
25	<i>a</i>	4,904	99,55	0,542	-181,7	204,1
	<i>b</i>	-0,653	99,61	0,589	-196,4	1,105
26	<i>a</i>	5,380	99,51	0,569	-188,6	201,3
	<i>b</i>	-0,673	100,1	0,571	-196	195,2
27	<i>a</i>	5,529	100,4	0,558	-192,2	203,7
	<i>b</i>	-0,727	100	0,589	-196,1	196,1
28	<i>a</i>	4,584	99,9	0,589	-189,6	201,9
	<i>b</i>	-0,539	99,48	0,569	-194,7	195,9
29	<i>a</i>	5,272	99,34	0,582	-191	200,9
	<i>b</i>	-0,688	99,47	0,582	-194,6	194,4
30	<i>a</i>	4,152	99,63	0,613	-188,6	201,2
	<i>b</i>	-0,555	100,3	0,6	-198,3	195,6
32	<i>a</i>	4,612	99,51	0,568	-188,6	201,3
	<i>b</i>	-0,526	100,1	0,571	-196	195,3

**Tabel 4.18** Hasil Estimasi Parameter *Bayesian* (Lanjutan)

Grid	Parameter	Mean	Standar Deviasi	MC error	2.5%	97.5%
33	<i>a</i>	3,437	99,71	0,545	-190,2	202,5
	<i>b</i>	-0,477	99,4	0,551	-192,7	195,4
34	<i>a</i>	3,693	99,31	0,581	-185,6	201
	<i>b</i>	-0,522	99,29	0,532	-194,2	195,9
35	<i>a</i>	3,639	99,91	0,54	-191,2	203,2
	<i>b</i>	-0,544	99,36	0,571	-193,4	196,4
36	<i>a</i>	4,211	99,38	0,565	-189,3	201,8
	<i>b</i>	-0,595	99,68	0,581	-194,3	196,4
37	<i>a</i>	4,855	99,4	0,563	-188,2	200,7
	<i>b</i>	-0,592	99,43	0,545	-193,2	195,8
38	<i>a</i>	5,572	99,24	0,601	-186,5	199,9
	<i>b</i>	-0,746	99,67	0,596	-194,4	196,1
39	<i>a</i>	4,627	99,24	0,601	-186,8	199,6
	<i>b</i>	-0,600	99,67	0,596	-194,5	196
40	<i>a</i>	4,249	100,2	0,604	-191,1	202,4
	<i>b</i>	-0,568	99,87	0,537	-193,4	195,3
43	<i>a</i>	5,451	99,17	0,579	-188,2	198,9
	<i>b</i>	-0,715	100,4	0,575	-196,8	197
44	<i>a</i>	4,861	99,63	0,613	-188,4	201,5
	<i>b</i>	-0,657	100,3	0,600	-198,2	195,7
45	<i>a</i>	5,529	99,4	0,563	-187,8	201,1
	<i>b</i>	-0,717	99,43	0,545	-193,1	195,9
46	<i>a</i>	4,739	99,47	0,607	-189,8	199,7
	<i>b</i>	-0,582	100	0,554	-194,4	195,5
47	<i>a</i>	5,494	99,55	0,542	-186,9	205
	<i>b</i>	-0,672	99,61	0,589	-196,3	194,2
48	<i>a</i>	6,259	100,3	0,549	-186,8	205,6
	<i>b</i>	-0,863	99,32	0,554	-191,1	197,3
49	<i>a</i>	-	-	-	-	-
	<i>b</i>	-	-	-	-	-
50	<i>a</i>	5,768	99,91	0,576	-189,5	202,1
	<i>b</i>	-1,123	99,79	0,565	-194,5	195,8
56	<i>a</i>	5,108	99,63	0,579	-188,6	202
	<i>b</i>	-0,696	99,35	0,588	-194,5	194,8

Pada Tabel 4.18 menunjukkan bahwa mean mempresentasikan nilai estimasi nilai rata-rata *Posterior* untuk model *Bayesian*. Nilai tersebut yang akan dimasukkan ke dalam model *Bayesian*. *Markov chain error* menunjukkan nilai error dalam penyusunan *Markov Chain Monte Carlo* dengan *gibbs sampling* yang menghasilkan nilai yang relatif kecil atau dapat dikatakan baik. Karena nilai *markov chain* lebih kecil 5% dari standar deviasi sehingga berpengaruh signifikan. Jika semua analisis *Bayesian* sudah terpenuhi, langkah terakhir yang diperlukan yaitu membuat model *Bayesian* menggunakan estimasi mean parameter *Bayesian* yang ditunjukkan pada Tabel 4.19 berikut.

**Tabel 4.19** Hasil Pemodelan *Bayesian*

Grid	Model <i>Bayesian</i>	Grid	Model <i>Bayesian</i>
1	$\text{Log}(N) = 4,918 - 0,651 M$	30	$\text{Log}(N) = 4,152 - 0,555 M$
3	$\text{Log}(N) = 3,273 - 0,501 M$	32	$\text{Log}(N) = 4,612 - 0,526 M$

**Tabel 4.19** Hasil Pemodelan *Bayesian* (Lanjutan)

Grid	Model <i>Bayesian</i>	Grid	Model <i>Bayesian</i>
5	$\text{Log}(N) = 3,716 - 0,531 M$	33	$\text{Log}(N) = 3,437 - 0,477 M$
7	$\text{Log}(N) = 5,711 - 0,699 M$	34	$\text{Log}(N) = 3,693 - 0,522 M$
11	$\text{Log}(N) = 4,986 - 0,596 M$	35	$\text{Log}(N) = 3,639 - 0,544 M$
12	$\text{Log}(N) = 3,754 - 0,585 M$	36	$\text{Log}(N) = 4,211 - 0,595 M$
13	$\text{Log}(N) = 2,696 - 0,402 M$	37	$\text{Log}(N) = 4,855 - 0,592 M$
14	$\text{Log}(N) = 1,968 - 0,267 M$	38	$\text{Log}(N) = 5,572 - 0,746 M$
15	$\text{Log}(N) = 4,038 - 0,574 M$	39	$\text{Log}(N) = 4,627 - 0,600 M$
16	$\text{Log}(N) = 5,059 - 0,638 M$	40	$\text{Log}(N) = 4,249 - 0,568 M$
17	$\text{Log}(N) = 5,911 - 0,736 M$	43	$\text{Log}(N) = 5,451 - 0,715 M$
21	$\text{Log}(N) = 4,817 - 0,611 M$	44	$\text{Log}(N) = 4,861 - 0,657 M$
22	$\text{Log}(N) = 4,857 - 0,664 M$	45	$\text{Log}(N) = 5,529 - 0,717 M$
23	$\text{Log}(N) = 2,514 - 0,383 M$	46	$\text{Log}(N) = 4,739 - 0,582 M$
24	$\text{Log}(N) = 2,643 - 0,351 M$	47	$\text{Log}(N) = 5,494 - 0,672 M$
25	$\text{Log}(N) = 4,904 - 0,653 M$	48	$\text{Log}(N) = 6,259 - 0,863 M$
26	$\text{Log}(N) = 5,380 - 0,673 M$	49	-
27	$\text{Log}(N) = 5,529 - 0,727 M$	50	$\text{Log}(N) = 5,768 - 1,123 M$
28	$\text{Log}(N) = 4,584 - 0,539 M$	56	$\text{Log}(N) = 5,108 - 0,696 M$
29	$\text{Log}(N) = 5,272 - 0,688 M$		

Tabel 4.19 menunjukkan bahwa magnitudo yang terjadi memiliki pengaruh negatif terhadap frekuensi gempa bumi pada semua grid penelitian dengan contoh dalam grid 37 yang memiliki persamaan  $\text{Log } N = 4,855 - 0,592 M$  memiliki arti gempa bumi yang terjadi di grid 37 naik sebesar satu satuan, maka nilai log frekuensi gempa bumi akan berkurang sebesar 0,592 satuan. Apabila grid 37 memiliki nilai magnitudo nol, maka besar nilai log frekuensi adalah sebesar 4,855 satuan. Pada grid 11 memperoleh persamaan linear  $\text{Log } N = 3,754 - 0,585 M$  dapat menunjukkan apabila magnitudo gempa bumi yang terjadi di grid 11 mengalami kenaikan sebesar satu satuan, maka nilai log frekuensi gempa bumi akan berkurang sebesar 0,585 sedangkan apabila grid 11 memiliki magnitudo yang bernilai nol, maka besar nilai log frekuensi gempa bumi atau  $\text{Log } N$  sebesar 3,754 satuan. Demikian pula untuk hubungan antara magnitudo dengan frekuensi gempa bumi pada setiap grid wilayah lainnya. Dapat juga dimisalkan menghitung frekuensi gempa bumi dengan magnitudo terkecil atau  $M_0$  dan  $\bar{M}$  dalam wilayah grid penelitian dengan skala *richter* seperti pada Tabel berikut.

**Tabel 4.20** Perhitungan Frekuensi Gempa Bumi dengan  $M_{max}$  dan  $\bar{M}$  *Bayesian*

Grid	$M_{max}$		$\bar{M}$	
	$y = \text{Log}(N)$	$N$	$y = \text{Log}(N)$	$N$
1	$4,918 - 0,651 (6,5) = 2,639$	436,013	$4,918 - 0,651 (3,4) = 4,385$	24254,930
3	$3,273 - 0,501 (6,3) = 0,117$	1,3082	$3,273 - 0,501 (5,8) = 0,367$	2,329
5	$3,716 - 0,531 (6) = 0,536$	3,435	$3,716 - 0,531 (4,2) = 1,490$	30,902
7	$5,711 - 0,699 (7,2) = 0,678$	4,766	$5,711 - 0,699 (4,4) = 2,635$	431,916
11	$4,986 - 0,596 (7,7) = 0,397$	2,493	$4,986 - 0,596 (3,6) = 2,840$	692,468
12	$3,754 - 0,585 (6,4) = 0,010$	1,023	$3,754 - 0,585 (3,4) = 1,765$	58,210
13	$2,696 - 0,402 (6,4) = 0,123$	1,328	$2,696 - 0,402 (4,9) = 0,726$	5,323
14	$1,968 - 0,267 (6,3) = 0,286$	1,931	$1,968 - 0,267 (4,9) = 0,659$	4,567
15	$4,038 - 0,574 (6,5) = 0,307$	2,027	$4,038 - 0,574 (3,7) = 1,914$	82,072
16	$5,059 - 0,638 (6,6) = 0,848$	7,050	$5,059 - 0,638 (3,2) = 3,017$	1040,878
17	$5,911 - 0,736 (7,1) = 0,685$	4,846	$5,911 - 0,736 (3,8) = 3,114$	1300,768

**Tabel 4.10** Perhitungan Frekuensi Gempa Bumi dengan  $M_{max}$  dan  $\bar{M}$  Bayesian (Lanjutan)

Grid	$M_{max}$		$\bar{M}$	
	$y = \text{Log}(N)$	$N$	$y = \text{Log}(N)$	$N$
21	4,817 - 0,611 (7,7) = 0,112	1,295	4,817 - 0,611 (3,9) = 2,434	271,706
22	4,857 - 0,664 (6,8) = 0,342	2,196	4,857 - 0,664 (3,6) = 2,467	292,819
23	2,514 - 0,383 (5,9) = 0,254	1,795	2,514 - 0,383 (4,4) = 0,829	6,742
24	2,643 - 0,351 (6,4) = 0,403	2,529	2,643 - 0,351 (5) = 0,893	7,816
25	4,904 - 0,653 (7,5) = 0,007	1,015	4,904 - 0,653 (3,1) = 2,879	758,053
26	5,380 - 0,673 (6,9) = 0,736	5,448	5,380 - 0,673 (3,3) = 3,159	1442,447
27	5,529 - 0,727 (7,2) = 0,295	1,970	5,529 - 0,727 (3,5) = 2,984	964,939
28	4,584 - 0,539 (7,9) = 0,326	2,117	4,584 - 0,539 (3,7) = 2,589	388,776
29	5,272 - 0,688 (6,9) = 0,525	3,348	5,272 - 0,688 (3,9) = 2,589	387,971
30	4,152 - 0,555 (5,9) = 0,877	7,5422	4,152 - 0,555 (3,3) = 2,320	209,170
32	4,612 - 0,526 (7,1) = 0,877	7,5404	4,612 - 0,526 (3,6) = 2,718	522,877
33	3,437 - 0,477 (6,3) = 0,432	2,703	3,437 - 0,477 (3,8) = 1,624	42,111
34	3,693 - 0,522 (6,4) = 0,352	2,250	3,693 - 0,522 (4,6) = 1,292	19,579
35	3,639 - 0,544 (6,6) = 0,049	1,118	3,639 - 0,544 (2,8) = 2,116	130,557
36	4,211 - 0,595 (6,6) = 0,283	1,918	4,211 - 0,595 (3,3) = 2,247	176,400
38	5,572 - 0,746 (6,3) = 0,872	7,450	5,572 - 0,746 (4,1) = 2,513	326,136
39	4,627 - 0,600 (7,2) = 0,307	2,027	4,627 - 0,600 (4) = 2,227	168,655
40	4,249 - 0,568 (6,2) = 0,727	5,338	4,249 - 0,568 (3,8) = 2,091	123,197
43	5,451 - 0,715 (6,6) = 0,731	5,382	5,451 - 0,715 (3,4) = 3,019	1044,720
44	4,861 - 0,657 (6,2) = 0,787	6,117	4,861 - 0,657 (3,2) = 2,758	572,268
45	5,529 - 0,717 (7) = 0,510	3,235	5,529 - 0,717 (3,1) = 3,306	2024,417
46	4,739 - 0,582 (7,3) = 0,490	3,093	4,739 - 0,582 (3,4) = 2,760	575,705
47	5,494 - 0,672 (7,3) = 0,588	3,876	5,494 - 0,672 (4,5) = 2,470	295,120
48	6,259 - 0,863 (7,2) = 0,045	1,110	6,259 - 0,863 (4,5) = 2,376	237,410
49	-	-	-	-
50	5,768 - 1,123 (5) = 0,153	1,422	5,768 - 1,123 (4,6) = 0,602	4,001
56	5,108 - 0,696 (6,2) = 0,793	6,205	5,108 - 0,696 (3,4) = 2,742	551,569

Tabel 4.20 dapat menghasilkan perbandingan, kejadian gempa bumi dengan perhitungan magnitudo rata-rata atau  $\bar{M}$  menghasilkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan magnitudo terbesar atau  $M_{max}$ . Artinya semakin kecil magnitudo yang terjadi di wilayah grid penelitian, maka semakin sering terjadi gempa bumi. Seperti pada grid 1, kejadian gempa bumi dengan magnitudo  $\bar{M}$  sebesar 3,4 terjadi sekitar 24255 kali dalam 14 tahun. Sedangkan kejadian gempa bumi dengan magnitudo  $M_{max}$  sebesar 6,5 terjadi sekitar 436 kali dalam 14 tahun. Sama seperti sebelumnya, model dalam grid 49 tidak muncul dikarenakan gempa yang terjadi dalam 14 tahun hanya terjadi 1 kali selama periode penelitian.

#### 4.5 Pemilihan Model Terbaik

Berdasarkan hasil dari nilai parameter metode *Gutenberg-Ritcher* dan *Bayesian* dapat dibandingkan untuk melihat perbedaan dari keduanya. Dibawah ini merupakan Tabel 2.21 perbandingan kedua parameter.

**Tabel 4.21** Perbandingan Nilai Parameter dari *Gutenberg-Ritcher* dan *Bayesian*

Grid	Parameter		Keterangan
	<i>Gutenberg-Ritcher</i>	<i>Bayesian</i>	
1	<i>a</i>	4,914	<
	<i>b</i>	0,650	<



**Tabel 4.21** Perbandingan Nilai Parameter dari *Gutenberg-Ritcher* dan *Bayesian* (Lanjutan)

Grid	Parameter		Keterangan	
	<i>Gutenberg-Ritcher</i>	<i>Bayesian</i>		
3	<i>a</i>	3,338	3,273	>
	<i>b</i>	0,511	0,501	>
5	<i>a</i>	3,721	3,716	>
	<i>b</i>	0,531	0,531	=
7	<i>a</i>	5,718	5,711	>
	<i>b</i>	0,700	0,699	>
11	<i>a</i>	4,983	4,986	<
	<i>b</i>	0,596	0,596	=
12	<i>a</i>	3,758	3,754	>
	<i>b</i>	0,586	0,585	>
13	<i>a</i>	2,702	2,696	>
	<i>b</i>	0,403	0,402	>
14	<i>a</i>	1,981	1,968	>
	<i>b</i>	0,269	0,267	>
15	<i>a</i>	4,038	4,038	=
	<i>b</i>	0,574	0,574	=
16	<i>a</i>	5,058	5,059	<
	<i>b</i>	0,637	0,638	<
17	<i>a</i>	5,916	5,911	>
	<i>b</i>	0,737	0,736	>
21	<i>a</i>	4,818	4,817	>
	<i>b</i>	0,611	0,611	=
22	<i>a</i>	4,856	4,857	<
	<i>b</i>	0,665	0,664	>
23	<i>a</i>	2,517	2,514	>
	<i>b</i>	0,384	0,383	>
24	<i>a</i>	2,644	2,643	>
	<i>b</i>	0,351	0,351	=
25	<i>a</i>	4,904	4,904	=
	<i>b</i>	0,653	0,653	=
26	<i>a</i>	5,383	5,380	>
	<i>b</i>	0,674	0,673	>
27	<i>a</i>	5,532	5,529	>
	<i>b</i>	0,727	0,727	=
28	<i>a</i>	4,585	4,584	>
	<i>b</i>	0,539	0,539	=
29	<i>a</i>	5,269	5,272	<
	<i>b</i>	0,688	0,688	=
30	<i>a</i>	4,157	4,152	>
	<i>b</i>	0,557	0,555	>
32	<i>a</i>	4,613	4,612	>
	<i>b</i>	0,527	0,526	>
33	<i>a</i>	3,438	3,437	>
	<i>b</i>	0,477	0,477	=
34	<i>a</i>	3,697	3,693	>
	<i>b</i>	0,523	0,522	>

**Tabel 4.21** Perbandingan Nilai Parameter dari *Gutenberg-Ritcher* dan *Bayesian* (Lanjutan 2)

Grid	Parameter		Keterangan	
	<i>Gutenberg-Ritcher</i>	<i>Bayesian</i>		
35	<i>a</i>	3,637	3,639	<
	<i>b</i>	0,543	0,544	<
36	<i>a</i>	4,212	4,211	>
	<i>b</i>	0,596	0,595	>
37	<i>a</i>	4,859	4,855	>
	<i>b</i>	0,593	0,592	>
38	<i>a</i>	5,567	5,572	<
	<i>b</i>	0,745	0,746	<
39	<i>a</i>	4,628	4,627	>
	<i>b</i>	0,600	0,600	=
40	<i>a</i>	4,250	4,249	>
	<i>b</i>	0,568	0,568	=
43	<i>a</i>	5,454	5,451	>
	<i>b</i>	0,715	0,715	=
44	<i>a</i>	4,858	4,861	<
	<i>b</i>	0,657	0,657	=
45	<i>a</i>	5,531	5,529	>
	<i>b</i>	0,717	0,717	=
46	<i>a</i>	4,741	4,739	>
	<i>b</i>	0,582	0,582	=
47	<i>a</i>	5,497	5,494	>
	<i>b</i>	0,672	0,672	=
48	<i>a</i>	6,266	6,259	>
	<i>b</i>	0,864	0,863	>
49	<i>a</i>	-	-	-
	<i>b</i>	-	-	-
50	<i>a</i>	5,823	5,768	>
	<i>b</i>	1,136	1,123	<
56	<i>a</i>	5,111	5,108	>
	<i>b</i>	0,697	0,696	>

Dari perbandingan nilai parameter pada Tabel 4.11 bahwa perhitungan dari *Gutenberg-Ritcher* memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan perhitungan dari *Bayesian* yang mana hasil dari pemodelan akan menghasilkan nilai yang sama. Namun, terdapat beberapa perhitungan *Bayesian* memiliki nilai yang lebih besar ataupun sama dibandingkan perhitungan *Gutenberg-Ritcher*. Seperti pada perhitungan *Bayesian*, nilai parameter *a* di grid 1, 11, 16, 22, 29, 35, 38, dan 44 serta parameter *b* di grid 1, 16, 35, 38, dan 50 memiliki nilai yang lebih tinggi. Terdapat juga hasil parameter *a* yang memiliki nilai yang sama yaitu pada grid 15 dan 25. Parameter *b* memiliki nilai yang sama antara kedua metode yaitu di grid 5, 11, 15, 21, 24, 25, 27, 28, 29, 33, 39, 40, 43, 44, 45, 46, dan 47. Perbedaan dari kedua perhitungan dapat terlihat walaupun nilai yang dihasilkan tidak terlalu signifikan.

Kriteria model terbaik antara *Gutenberg-Ritcher* dan *Bayesian* dengan membandingkan nilai AIC keduanya. Model terbaik dipilih berdasarkan nilai kriteria terkecil. Perbandingan model terbaik menggunakan *Gutenberg-Ritcher* dan *Gutenberg-Ritcher* berbasis *Bayesian* disajikan pada Tabel 4.22.

**Tabel 4.22** Perbandingan Hasil AIC Model *Gutenberg-Ritcher* dan *Bayesian*

<b>Grid</b>	<b>Gutenberg-Ritcher</b>	<b>Bayesian</b>	<b>Keterangan</b>
1	32,379	32,410	<i>Gutenberg-Ritcher</i>
3	-	-24,372	<i>Bayesian</i>
5	-9,730	-10,700	<i>Bayesian</i>
7	29,380	29,614	<i>Gutenberg-Ritcher</i>
11	61,566	61,831	<i>Bayesian</i>
12	12,800	14,571	<i>Gutenberg-Ritcher</i>
13	-5,683	-7,810	<i>Bayesian</i>
14	-4,568	-8,656	<i>Bayesian</i>
15	12,969	13,065	<i>Gutenberg-Ritcher</i>
16	54,937	54,362	<i>Bayesian</i>
17	37,895	37,342	<i>Bayesian</i>
21	25,206	25,247	<i>Gutenberg-Ritcher</i>
22	22,641	22,903	<i>Gutenberg-Ritcher</i>
23	-8,026	-10,967	<i>Bayesian</i>
24	-3,476	-3,659	<i>Bayesian</i>
25	45,319	46,167	<i>Gutenberg-Ritcher</i>
26	62,542	62,131	<i>Bayesian</i>
27	38,349	38,309	<i>Bayesian</i>
28	67,386	68,570	<i>Gutenberg-Ritcher</i>
29	18,929	18,539	<i>Bayesian</i>
30	27,962	27,364	<i>Bayesian</i>
32	65,146	64,779	<i>Bayesian</i>
33	6,934	6,399	<i>Bayesian</i>
34	-11,437	-12,173	<i>Bayesian</i>
35	25,981	29,434	<i>Gutenberg-Ritcher</i>
36	26,917	27,799	<i>Gutenberg-Ritcher</i>
37	54,416	54,219	<i>Bayesian</i>
38	4,962	4,411	<i>Bayesian</i>
39	19,431	21,172	<i>Gutenberg-Ritcher</i>
40	19,547	19,655	<i>Gutenberg-Ritcher</i>
43	42,715	42,434	<i>Bayesian</i>
44	34,034	33,852	<i>Bayesian</i>
45	55,902	55,339	<i>Bayesian</i>
46	68,230	68,208	<i>Bayesian</i>
47	25,035	24,931	<i>Bayesian</i>
48	-16,867	-17,137	<i>Bayesian</i>
49	-	-	-
50	-5,9257	-16,221	<i>Bayesian</i>
56	23,112	22,500	<i>Bayesian</i>

Berdasarkan Tabel 4.22, dapat dilihat bahwa AIC yang dihasilkan terdapat nilai positif dan negatif. Dimana jika nilai AIC semakin negatif atau kecil menandakan bahwa model yang dihasilkan baik tetapi jika nilai AIC semakin positif atau besar menandakan bahwa model yang dihasilkan tidak baik dan kurang layak untuk dipilih. Seluruh nilai AIC dari kedua model dibandingkan menghasilkan model *Gutenberg-Ritcher* berbasis *Bayesian* memiliki nilai AIC terkecil sebanyak 25 dari 39 model. Sisanya sebanyak 13 dari 39 model dihasilkan dari *Gutenberg-Ritcher*. Jadi dari seluruh perhitungan, sejumlah 64,1% dari 39 data menghasilkan

nilai AIC negatif atau terkecil dari model *Gutenberg-Ritcher* berbasis *Bayesian* sedangkan untuk sisanya sebesar 35,9% menghasilkan nilai AIC terkecil dari model *Gutenberg-Ritcher*. Disimpulkan bahwa metode *Bayesian* memberikan model terbaik, maka dapat dikatakan untuk melakukan analisis pemetaan daerah risiko gempa dapat menggunakan metode *Gutenberg-Ritcher* berbasis *Bayesian*.

#### 4.6 Pemetaan Daerah Risiko Bencana

Perhitungan untuk jumlah rata-rata tahunan gempa bumi, risiko terjadinya gempa, dan periode pengulangan dapat menggunakan model Bayesian. Karena hasil dari perbandingan AIC terkecil mendapatkan bahwa model terbaik yaitu metode *Gutenberg-Ritcher* berbasis *Bayesian*. Jumlah rata-rata tahunan gempa bumi merupakan nilai yang menggambarkan jumlah total kejadian gempa bumi dalam waktu tertentu pada suatu daerah pengamatan. Jumlah rata-rata tahunan gempa bumi yang terjadi untuk setiap grid wilayah penelitian di wilayah Indonesia ditampilkan pada Tabel 4.23.

**Tabel 4.23** Jumlah Rata-Rata Tahunan Gempa Bumi

Grid	n(M)	Grid	n(M)
1	24,473	30	11,107
3	0,136	32	29,895
5	1,744	33	2,683
7	18,924	34	1,047
11	35,244	35	7,099
12	2,744	36	9,139
13	0,387	37	41,239
14	0,521	38	12,789
15	4,281	39	7,882
16	48,988	40	6,130
17	49,074	43	40,957
21	13,654	44	26,191
22	12,107	45	80,568
23	0,527	46	28,563
24	0,674	47	13,212
25	32,368	48	7,069
26	61,159	49	-
27	38,839	50	0,095
28	20,895	56	21,337
29	16,849		

Berdasarkan Tabel 4.23 hasil jumlah rata-rata tahunan gempa bumi pada 39 grid wilayah jumlah kejadian yang memiliki nilai terbesar terdapat pada grid wilayah penelitian 45 sebesar 80,568. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat kejadian gempa bumi pada wilayah sekitar Bali, Nusa Tenggara Barat dan sekitarnya merupakan wilayah yang paling rawan terjadi gempa dibandingkan pada wilayah penelitian lainnya. Semakin jumlah rata-rata tahunan kejadian besar maka semakin sering terjadi gempa bumi dan begitu sebaliknya. Risiko gempa bumi merupakan besaran kemungkinan terjadinya paling sedikit satu kali terjadi gempa bumi (merusak) di suatu daerah dalam periode (tahun) dan magnitudo tertentu. Menghitung kemungkinan risiko gempa bumi dapat menggunakan hasil dari jumlah rata-rata tahunan gempa bumi. Tabel 4.23 menyajikan risiko kejadian gempa bumi. Periode untuk menghitung kemungkinan risiko gempa bumi dengan  $T = 1, 5, 10,$  dan 20 tahun. Berdasarkan Tabel 4.24 hasil pengamatan dengan

rentang waktu 1 sampai 20 tahun dijelaskan bahwa semakin lama rentang waktu pengamatan ( $T$ ), maka kemungkinan risiko gempa bumi akan semakin tinggi.

**Tabel 4.24** Risiko Terjadinya Gempa Bumi

Grid	R(M)			
	1 Tahun	5 Tahun	10 Tahun	20 Tahun
1	1,000	1,000	1,000	1,000
3	0,127	0,494	0,744	0,934
5	0,825	0,999	1,000	1,000
7	1,000	1,000	1,000	1,000
11	1,000	1,000	1,000	1,000
12	0,936	0,999	1,000	1,000
13	0,321	0,856	0,979	0,999
14	0,406	0,926	0,994	0,999
15	0,986	1,000	1,000	1,000
16	1,000	1,000	1,000	1,000
17	1,000	1,000	1,000	1,000
21	0,999	1,000	1,000	1,000
22	0,999	1,000	1,000	1,000
23	0,409	0,928	0,995	0,999
24	0,490	0,966	0,998	0,999
25	1,000	1,000	1,000	1,000
26	1,000	1,000	1,000	1,000
27	1,000	1,000	1,000	1,000
28	1,000	1,000	1,000	1,000
29	1,000	1,000	1,000	1,000
30	0,999	1,000	1,000	1,000
32	1,000	1,000	1,000	1,000
33	0,934	0,999	1,000	1,000
34	0,649	0,995	0,999	1,000
35	0,999	1,000	1,000	1,000
36	0,999	1,000	1,000	1,000
37	1,000	1,000	1,000	1,000
38	0,999	1,000	1,000	1,000
39	0,999	1,000	1,000	1,000
40	0,997	1,000	1,000	1,000
43	1,000	1,000	1,000	1,000
44	1,000	1,000	1,000	1,000
45	1,000	1,000	1,000	1,000
46	1,000	1,000	1,000	1,000
47	0,999	1,000	1,000	1,000
48	0,999	1,000	1,000	1,000
49	-	-	-	-
50	0,091	0,379	0,615	0,8555
56	1,000	1,000	1,000	1,000

Terbukti dari nilai yang dihasilkan tiap wilayah penelitian secara keseluruhan menghasilkan nilai 1 atau artinya memiliki tingkat risiko gempa bumi yang cukup tinggi. Wilayah Papua atau penelitian grid 50 memiliki kemungkinan risiko gempa bumi yang cukup rendah daripada wilayah lainnya. Nilai jumlah rata-rata tahunan dapat memberikan kemudahan juga untuk mengetahui periode ulang gempa bumi. Periode ulang digunakan untuk menentukan terjadinya kembali gempa bumi dengan magnitudo tertentu di suatu wilayah. Sehingga dapat meminimalisir kerusakan yang terjadi atau dapat mencegah sekecil mungkin. Periode ulang yang rendah atau pendek mempresentasikan wilayah dengan aktivitas kegempaan yang cukup tinggi. Tabel 4.25 menunjukkan periode ulang gempa bumi dengan magnitudo tertentu untuk masing-masing grid wilayah penelitian di Indonesia.

**Tabel 4.25** Periode Ulang Gempa Bumi

Grid	Q(T)	Grid	Q(T)
1	0,041	30	0,090
3	7,346	32	0,033
5	0,573	33	0,373
7	0,053	34	0,955
11	0,028	35	0,148
12	0,364	36	0,109
13	2,582	37	0,024
14	1,919	38	0,078
15	0,233	39	0,127
16	0,020	40	0,163
17	0,020	43	0,024
21	0,073	44	0,038
22	0,083	45	0,012
23	1,897	46	0,035
24	1,483	47	0,076
25	0,031	48	0,141
26	0,016	49	-
27	0,026	50	10,488
28	0,047	56	0,047
29	0,059		

Dari perhitungan periode ulang gempa bumi diketahui bahwa wilayah grid 45 memiliki periode tersingkat untuk gempa bumi kembali dengan magnitudo tertentu pada interval waktu 0,012 tahun. Dengan kata lain gempa bumi pada wilayah Bali, Nusa Tenggara Barat, dan sekitarnya tersebut akan terjadi kembali dalam kurun waktu 0,012 tahun (sekitar 4 hari). Gempa bumi dengan periode ulang terlama terdapat di wilayah grid 50 sebesar 10,488 yang artinya gempa bumi di wilayah Papua akan terjadi kembali dalam kurun waktu 10,5 tahun (sekitar 3.832 hari) setelah hari kejadian gempa bumi.

**Tabel 4.26** Pemetaan Daerah Risiko Gempa Bumi di Indonesia

Grid	n(M)	R(M)	Q(T)	Grid	n(M)	R(M)	Q(T)
1	24,473	1,000	0,041	30	11,107	0,999	0,090
3	0,136	0,127	7,346	32	29,895	1,000	0,033
5	1,744	0,825	0,573	33	2,683	0,934	0,373
7	18,924	1,000	0,053	34	1,047	0,649	0,955
11	35,244	1,000	0,028	35	7,099	0,999	0,148
12	2,744	0,936	0,364	36	9,139	0,999	0,109
13	0,387	0,321	2,582	37	41,239	1,000	0,024

**Tabel 4.26** Pemetaan Daerah Risiko Gempa Bumi di Indonesia (Lanjutan)

<b>Grid</b>	<b>n(M)</b>	<b>R(M)</b>	<b>Q(T)</b>	<b>Grid</b>	<b>n(M)</b>	<b>R(M)</b>	<b>Q(T)</b>
14	0,521	0,406	1,919	38	12,789	0,999	0,078
15	4,281	0,986	0,233	39	7,882	0,999	0,127
16	48,988	1,000	0,020	40	6,130	0,997	0,163
17	49,074	1,000	0,020	43	40,957	1,000	0,024
21	13,654	0,999	0,073	44	26,191	1,000	0,038
22	12,107	0,999	0,083	45	80,568	1,000	0,012
23	0,527	0,409	1,897	46	28,563	1,000	0,035
24	0,674	0,490	1,483	47	13,212	0,999	0,076
25	32,368	1,000	0,031	48	7,069	0,999	0,141
26	61,159	1,000	0,016	49	-	-	-
27	38,839	1,000	0,026	50	0,095	0,091	10,488
28	20,895	1,000	0,047	56	21,337	1,000	0,047
29	16,849	1,000	0,059				

Perhitungan dari jumlah rata-rata tahunan, kemungkinan risiko terjadinya, dan periode ulang keterkaitan satu sama lain. Karena periode ulang yang pendek biasanya memiliki korelasi dengan wilayah dengan aktivitas kegempaan yang semakin tinggi. Hasil periode ulang tertinggi berada pada grid 50 yaitu wilayah Papua sebesar 10,488. Dimana gempa akan terjadi dalam 10,5 tahun yang dapat dibuktikan dalam nilai kemungkinan risiko terjadinya dan jumlah rata-rata gempa bumi. Nilai jumlah rata-rata wilayah Papua termasuk kecil dan kemungkinan terjadinya gempa bumi juga rendah karena termasuk wilayah yang jarang terjadi gempa bumi. Berbanding terbalik pada grid 45 yaitu wilayah Bali, Nusa Tenggara, dan sekitarnya menghasilkan nilai jumlah rata-rata dan kemungkinan terjadinya gempa bumi tergolong tinggi. Karena itu wilayah tersebut paling rawan terjadi gempa bumi yang dapat dilihat dalam nilai periode ulang terjadinya gempa sebesar 0,012 atau terjadi gempa kembali sekitar 4 hari.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Penelitian ini dilakukan untuk menentukan hubungan frekuensi-magnitudo data gempa bumi di wilayah Indonesia dapat dimodelkan dengan menggunakan *Gutenberg-Ritcher* dan *Gutenberg-Ritcher* berbasis *Bayesian*. *Bayesian* disini memiliki fungsi sebagai alternatif model *Gutenberg-Ritcher*. Hasil analisis dan perhitungan yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai.

1. Pemodelan *Gutenberg-Ritcher* dan *Gutenberg-Ritcher* berbasis *Bayesian* menunjukkan pengaruh negatif magnitudo terhadap frekuensi kejadian gempa bumi.
2. Pemodelan *Gutenberg-Ritcher* berbasis *Bayesian* memberikan hasil lebih baik dibandingkan pemodelan *Gutenberg-Ritcher* karena dominan menghasilkan AIC lebih kecil.
3. Pemetaan daerah risiko gempa bumi menghasilkan :
  - a. Daerah Bali, Nusa Tenggara Barat, dan sekitarnya memiliki tingkat frekuensi gempa bumi yang paling sering dalam satu tahun
  - b. Dalam satu tahun terdapat 43,6% (17 dari 39 wilayah) akan terjadi gempa bumi.
  - c. Daerah Bali, Nusa Tenggara Barat dan sekitarnya memiliki periode return terjadi gempa kembali paling singkat, yakni 0,012 tahun (sekitar 4 hari) dan wilayah Papua akan memiliki periode return terjadi gempa kembali paling lama yakni 10,5 tahun (sekitar 3832 hari) setelah hari kejadian gempa bumi.

#### **5.2 Saran**

Berdasarkan hasil penelitian tugas akhir ini, maka untuk penelitian selanjutnya saran yang dapat diberikan sebagai berikut.

1. Data yang digunakan dapat ditambahkan kembali agar menghasilkan model yang baik.
2. Pemilahan wilayah dapat didasarkan pada wilayah kabupaten atau provinsi

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M., Iriawan, N., & Irhamah, I. (2021). Pendekatan Bayesian untuk Analisis Survival pada Kasus Demam Berdarah Dengue Pasien RSUD Dr. Soetomo Surabaya. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, 9(2). <https://doi.org/10.12962/j23373520.v9i2.54448>.
- Adams, S., Bamanga, M., Olanrewaju, S., Yahaya, H., & Akano, R. (2020). Modeling COVID-19 Cases in Nigeria Using Some Selected Count Data Regression Models. *International Journal of Healthcare and Medical Sciences*, (64), 64-73
- Aki, K. (1965). Maximum likelihood estimate of  $b$  in the formula  $\log N=a-bM$  and its confidence limits. *Bulletin Of The Earthquake Research Institute*, 43, 237-239.
- Alamsyah, F. (2017). *Estimasi Momen Tensor dan Pola Bidang Sesar Amerika Serikat pada Tahun 2016-2017 dengan Inversi Waveform Tiga Komponen dengan Program Isola*. Surabaya, Jawa Timur: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Ayuputri, I. (2018). *Pemodelan Frekuensi Pembayaran Kredit Mobil di PT.X dengan Bayesian Geometric Regression dan Bayesian Mixture Geometric Regression*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana . (2016). *Risiko Bencana Indonesia* (pp. 30,56,59). Jakarta: Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2012). *Buku Saku Tanggap, Tangkas Tangguh Menghadapi Bencana* (pp. 1-6). Jakarta: Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- Bernstein, S., & Bernstein, R. (1999). *Schaum's Outline of Elements of Statistics I: Descriptive Statistics and Probability*. New York: The McGraw-Hili Companies, Inc.
- Box, G. E., & Tiao, G. C. (1973). *Bayesian Inference in Statistical Analysis*. University of Michigan: Addison-Wesley Pub. Co.
- Eluyemi, A., Baruah, S., & Baruah, S. (2019). Empirical relationships of earthquake magnitude scales and estimation of Gutenberg–Richter parameters in gulf of Guinea region. *Scientific African*, e00161. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00161>
- Gutenberg , B., & Richter, C. (1954). *Seismicity of the Earth and Associates Phenomena*. Princeton, New Jersey: Princenton University Press.
- Homer, S., Pasau, G., & Ferdy. (2013). Analisis Distribusi Frekuensi-Magnitudo Gempabumi Di Wilayah Sulawesi Utara. *Jurnal MIPA*, 2(2), 156.
- Jananto. (2013). Algoritma Naive Bayes untuk Mencari Perkiraan Waktu Studi Mahasiswa. *Jurnal Teknologi Informasi DINAMIK*, 18(1), 9-16.
- Kara, E. (2017). The Earthquake Risk Analysis Based on Copula Models for Turkey. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 35(2), 187-200.
- Kara, E., & Durukan, K. (2017). The Statistical Analysis of the Earthquake Hazard for Turkey by Generalized Linear Models. *Journal Of Science*, 30(4), 584-597.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2019). *Rentetan Bencana Sepanjang tahun 2012 - 2019 | Open Data PUPR*. [Data.pu.go.id](http://Data.pu.go.id).
- Khan, H., Vasilescu, L. G., & Khan, A. (2008). Disaster Management CYCLE – a theoretical approach. *Management and Marketing Journal*, 6(1), 43-50.
- Lunn, D., Jackson, C., Best, N., Thomas, A., & Spiegelhalter, D. (2012). *The BUGS Book A Practical Introduction to Bayesian Analysis*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Morales, J., Yu, W., & Telesca, L. (2019). Bayesian Analysis of the Magnitude of Earthquakes Located in a Seismic Region of Italy. *Proceedings*, 24(1), 1.
- Ntzoufras, I. (2009). *Bayesian Modeling using WinBUGS*. USA: John Wiley & Sons, Inc.

- Oktaviana, P., & Fithriasari, K. (2017). Bayesian Network Inference in Binary Logistic Regression: A Case Study of Salmonella sp Bacterial Contamination on Vannamei Shrimp. *Journal Of Mathematics And Statistics*, 13(4), 306-311. <https://doi.org/10.3844/jmssp.2017.306.311>
- Oktaviana, P., & Irhamah. (2021). Kolmogorov-Smirnov Goodness-of-Fit test for identifying distribution of the number of earthquakes and the losses due to earthquakes in Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1821(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1821/1/012045>
- Pasau, G., & Tanauma, A. (2011). Pemodelan Sumber Gempa di Wilayah Sulawesi Utara Sebagai Upaya Mitigasi Bencana Gempa Bumi. *Jurnal Ilmiah Sains*, 15(1), 202. <https://doi.org/10.35799/jis.11.2.2011.208>
- Pemerintah Indonesia. Undang-undang Nomor 24 Tahun 2007 Tentang Penanggulangan Bencana. Lembaran Negara RI Tahun 2007, No. 66. Sekretariat Negara, Jakarta.
- Pusat Pendidikan Dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi. (2017). *Modul Manajemen Penanggulangan Bencana Pelatihan Penanggulangan Bencana Banjir* (2nd ed., pp. 4-5). Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia.
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Sianipar17.files.wordpress.com:[https://sianipar17.files.wordpress.com/2018/12/nsha\\_2017.pdf](https://sianipar17.files.wordpress.com/2018/12/nsha_2017.pdf).
- Salim, M. A., & Siswanto, I. B. (2018). *Rekayasa Gempa*. Yogyakarta: K-Media.
- Sunarjo, Gunawan, M. T., & Pribadi, S. (2012). *Gempa Bumi Edisi Poluler* (pp. 25-33, 119). Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Suryani, T. A. (2007). *Analisis Komparatif Nilai Parameter Sismotektonik dari Hubungan Magnitudo-Kumulatif dan NonKumulatif untuk Jawa Timut Menggunakan Metode Kuadrat Terkecil dan Metode Maksimum Likelihood dari Data BMG dan USGS Tahun 1973-2003*. Semarang: Universitas Negeri Semarang.
- Sutrisno, W. (2018). *Pemetaan dan Implikasi Kebutuhan Ruang Kelas Fasilitas Pendidikan Menyongsong Bonus Demografi di Purwokerto Barat*. Purwokerto: Universitas Muhammadiyah Purwokerto.
- Taroni, F., Biedermann, A., Bozza, S., Garbolino, P., & Aitken, C. (2014). *Bayesian Networks for Probabilistic Inference and Decision Analysis in Forensic Science* (2nd ed.). West: Sussex: John Wiley & Sons, Inc.
- Utami, W., & Indardi, I. (2019). *Kartografi* (pp. 6-9). Yogyakarta: Sekolah Tinggi Pertahanan Nasional Yogyakarta.
- Wibowo, N., & Embri, J. (2017). Analisis Seismisitas dan Energi Gempabumi di Kawasan Jalur Sesar Opak-Oyo Yogyakarta. *Indonesian Journal Of Applied Physics*, 7(2), 82.

## LAMPIRAN

**Lampiran 1.** Data Gempa Bumi

Date	Time	Lat	Lon	MT	Region
01/11/2008	21:02:43.058	9.18 S	119.06 E	4.9	Sumba Region, Indonesia
01/11/2008	20:58:50.248	6.55 S	129.64 E	4.6	Banda Sea
01/11/2008	17:43:12.941	7.01 S	106.63 E	3.7	Java, Indonesia
01/11/2008	16:24:14.755	3.30 S	127.85 E	3.2	Seram, Indonesia
01/11/2008	16:20:37.327	6.41 S	129.54 E	4.3	Banda Sea
01/11/2008	14:47:00.029	7.37 S	105.31 E	3.3	Java, Indonesia
01/11/2008	13:04:38.742	0.10 N	98.55 E	4.7	Northern Sumatra, Indonesia
01/11/2008	10:23:51.646	7.07 S	129.67 E	4.8	Banda Sea
01/11/2008	09:50:32.503	3.32 S	128.02 E	2.3	Seram, Indonesia
01/11/2008	06:50:52.220	4.43 S	127.45 E	3.2	Banda Sea
01/11/2008	06:42:18.915	3.94 S	127.45 E	2.6	Seram, Indonesia
01/11/2008	06:23:00.287	3.43 S	128.39 E	2.3	Seram, Indonesia
01/11/2008	06:01:05.398	4.26 S	127.66 E	3.2	Banda Sea
01/11/2008	04:26:50.151	0.49 N	98.33 E	3.9	Northern Sumatra, Indonesia
01/11/2008	03:34:47.510	3.89 S	128.24 E	2.2	Seram, Indonesia
01/11/2008	03:24:09.020	3.76 S	127.38 E	2.9	Seram, Indonesia
01/11/2008	02:32:18.756	4.09 S	128.20 E	2.4	Banda Sea
01/11/2008	02:20:05.909	4.20 S	128.10 E	2.4	Banda Sea
01/11/2008	01:38:14.802	3.65 S	127.99 E	3.5	Seram, Indonesia
01/11/2008	01:34:29.660	6.61 S	129.39 E	5.5	Banda Sea
01/11/2008	00:31:25.143	0.60 S	98.90 E	3.0	Southern Sumatra, Indonesia
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
28/02/2022	12:17:05.185	0.01 N	125.99 E	3.5	Northern Molucca Sea
28/02/2022	10:31:34.775	0.10 N	100.00 E	4.3	Northern Sumatra, Indonesia
28/02/2022	09:28:38.004	0.71 S	122.26 E	3.0	Minahassa Peninsula, Sulawesi
28/02/2022	08:55:01.833	0.19 N	99.96 E	3.6	Northern Sumatra, Indonesia
28/02/2022	05:03:10.859	0.26 N	121.78 E	3.0	Minahassa Peninsula, Sulawesi
28/02/2022	04:32:28.197	0.26 N	99.87 E	3.0	Northern Sumatra, Indonesia
28/02/2022	01:43:45.281	7.53 S	121.83 E	3.8	Flores Sea
28/02/2022	01:18:08.781	8.00 S	120.60 E	3.6	Flores Sea
28/02/2022	01:04:46.460	8.51 S	118.36 E	2.6	Sumbawa Region, Indonesia
28/02/2022	01:02:18.180	8.03 S	120.57 E	3.4	Flores Region, Indonesia
28/02/2022	00:57:29.743	8.68 S	110.77 E	2.9	Java, Indonesia
28/02/2022	00:29:57.385	7.95 S	120.59 E	2.7	Flores Sea
28/02/2022	00:19:17.623	8.07 S	122.44 E	3.0	Flores Region, Indonesia

**Lampiran 2. Struktur Data Akhir per Grid Wilayah Penelitian**

Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
21	2,1	1	1034	3,014521	22	2,4	11	1050	3,0211893
	2,2	2	1033	3,0141		2,5	11	1039	3,0166155
	2,3	4	1031	3,013259		2,6	11	1028	3,0119931
	2,4	4	1027	3,01157		2,7	28	1017	3,007321
	2,5	10	1023	3,009876		2,8	35	989	2,9951963
	2,6	12	1013	3,005609		2,9	24	954	2,9795484
	2,7	16	1001	3,000434		3	30	930	2,9684829
	2,8	14	985	2,993436		3,1	48	900	2,9542425
	2,9	29	971	2,987219		3,2	63	852	2,9304396
	3	26	942	2,974051		3,3	53	789	2,897077
	3,1	43	916	2,961896		3,4	66	736	2,8668778
	3,2	46	873	2,941014		3,5	78	670	2,8260748
	3,3	45	827	2,917506		3,6	59	592	2,7723217
	3,4	59	782	2,893207		3,7	54	533	2,7267272
	3,5	55	723	2,859138		3,8	55	479	2,6803355
	3,6	53	668	2,824777		3,9	66	424	2,6273659
	3,7	50	615	2,788875		4	50	358	2,553883
	3,8	58	565	2,752048		4,1	53	308	2,4885507
	3,9	50	507	2,705008		4,2	50	255	2,4065402
	4	48	457	2,659916		4,3	40	205	2,3117539
	4,1	44	409	2,611723		4,4	39	165	2,2174839
	4,2	34	365	2,562293		4,5	18	126	2,1003705
	4,3	41	331	2,519828		4,6	23	108	2,0334238
	4,4	37	290	2,462398		4,7	26	85	1,9294189
	4,5	31	253	2,403121		4,8	13	59	1,770852
	4,6	34	222	2,346353		4,9	11	46	1,6627578
	4,7	29	188	2,274158		5	10	35	1,544068
	4,8	28	159	2,201397		5,1	6	25	1,39794
	4,9	44	131	2,117271		5,2	4	19	1,2787536
	5	20	87	1,939519		5,3	6	15	1,1760913
	5,1	16	67	1,826075		5,5	3	9	0,9542425
	5,2	12	51	1,70757		5,6	1	6	0,7781513
5,3	12	39	1,591065	5,7	1	5	0,69897		
5,4	8	27	1,431364	5,8	2	4	0,60206		
5,5	1	19	1,278754	6,1	1	2	0,30103		
5,6	4	18	1,255273	6,8	1	1	0		
5,7	3	14	1,146128	3,4	1	15	1,1760913		
5,8	2	11	1,041393	3,5	1	14	1,146128		
5,9	2	9	0,954243	3,6	2	13	1,1139434		
6	2	7	0,845098	3,8	1	11	1,0413927		
6,1	1	5	0,69897	3,9	1	10	1		
6,3	2	4	0,60206	4	1	9	0,9542425		
6,8	1	2	0,30103	4,2	1	8	0,90309		
7,7	1	1	0	4,3	1	7	0,845098		
22	1,9	1	1073	3,0305997	5,1	1	6	0,7781513	
	2	4	1072	3,0301948	5,2	3	5	0,69897	
	2,1	5	1068	3,0285713	5,7	1	2	0,30103	
	2,2	5	1063	3,0265333	5,9	1	1	0	
	2,3	8	1058	3,0244857					

**Lampiran 2. Struktur Data Akhir per Grid Wilayah Penelitian (Lanjutan)**

Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
24	3,1	1	18	1,2552725	25	5	10	39	1,5910646
	3,6	1	17	1,2304489		5,1	7	29	1,462398
	4,1	1	16	1,20412		5,2	5	22	1,3424227
	4,4	1	15	1,1760913		5,3	1	17	1,2304489
	4,6	1	14	1,146128		5,4	1	16	1,20412
	4,7	1	13	1,1139434		5,5	4	15	1,1760913
	4,9	1	12	1,0791812		5,6	2	11	1,0413927
	5	1	11	1,0413927		5,7	2	9	0,9542425
	5,2	1	10	1		5,8	1	7	0,845098
	5,3	2	9	0,9542425		5,9	1	6	0,7781513
	5,4	1	7	0,845098		6	2	5	0,69897
	5,5	1	6	0,7781513		6,2	2	3	0,4771213
	5,6	1	5	0,69897		7,5	1	1	0
	5,8	2	4	0,60206		1	3	8055	3,9060655
5,9	1	2	0,30103	1,1	1	8052	3,9059038		
6,4	1	1	0	1,2	3	8051	3,9058498		
25	1,3	1	2571	3,4101021	1,3	5	8048	3,905688	
	1,5	1	2570	3,4099331	1,4	3	8043	3,9054181	
	1,7	6	2569	3,4097641	1,5	4	8040	3,905256	
	1,8	3	2563	3,4087486	1,6	4	8036	3,9050399	
	1,9	13	2560	3,40824	1,7	9	8032	3,9048237	
	2	19	2547	3,4060289	1,8	15	8023	3,9043368	
	2,1	33	2528	3,4027771	1,9	26	8008	3,9035241	
	2,2	51	2495	3,3970705	2	40	7982	3,9021117	
	2,3	74	2444	3,3881012	2,1	48	7942	3,8999299	
	2,4	109	2370	3,3747483	2,2	108	7894	3,8972971	
	2,5	142	2261	3,3543006	2,3	124	7786	3,8913144	
	2,6	177	2119	3,326131	2,4	191	7662	3,8843421	
	2,7	141	1942	3,2882492	2,5	261	7471	3,8733787	
	2,8	145	1801	3,2555137	2,6	290	7210	3,8579353	
	2,9	173	1656	3,2190603	2,7	348	6920	3,8401061	
	3	143	1483	3,1711412	2,8	399	6572	3,8176976	
	3,1	149	1340	3,1271048	2,9	440	6173	3,7904963	
	3,2	161	1191	3,0759118	3	505	5733	3,7583819	
	3,3	152	1030	3,0128372	3,1	510	5228	3,7183356	
	3,4	127	878	2,9434945	3,2	525	4718	3,6737579	
	3,5	126	751	2,8756399	3,3	485	4193	3,6225249	
	3,6	87	625	2,79588	3,4	464	3708	3,5691397	
	3,7	82	538	2,7307823	3,5	413	3244	3,5110808	
	3,8	79	456	2,6589648	3,6	407	2831	3,4519399	
	3,9	55	377	2,5763414	3,7	360	2424	3,3845326	
	4	46	322	2,5078559	3,8	292	2064	3,3147097	
	4,1	52	276	2,4409091	3,9	265	1772	3,2484637	
	4,2	31	224	2,350248	4	246	1507	3,1781133	
	4,3	25	193	2,2855573	4,1	199	1261	3,1007151	
	4,4	25	168	2,2253093	4,2	186	1062	3,0261245	
	4,5	20	143	2,155336	4,3	161	876	2,9425041	
	4,6	23	123	2,0899051	4,4	138	715	2,854306	
	4,7	29	100	2	4,5	113	577	2,7611758	
	4,8	17	71	1,8512583	4,6	99	464	2,666518	
4,9	15	54	1,7323938	4,7	104	365	2,5622929		

**Lampiran 2. Struktur Data Akhir per Grid Wilayah Penelitian (Lanjutan 2)**

Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
26	4,8	79	261	2,4166405	27	5,1	25	88	1,9444827
	4,9	58	182	2,2600714		5,2	16	63	1,7993405
	5	36	124	2,0934217		5,3	9	47	1,6720979
	5,1	29	88	1,9444827		5,4	10	38	1,5797836
	5,2	16	59	1,770852		5,5	7	28	1,447158
	5,3	8	43	1,6334685		5,6	7	21	1,3222193
	5,4	8	35	1,544068		5,7	4	14	1,146128
	5,5	5	27	1,4313638		5,8	1	10	1
	5,6	5	22	1,3424227		5,9	1	9	0,9542425
	5,7	2	17	1,2304489		6	1	8	0,90309
	5,8	4	15	1,1760913		6,1	2	7	0,845098
	5,9	1	11	1,0413927		6,2	1	5	0,69897
	6	2	10	1		6,3	1	4	0,60206
	6,1	2	8	0,90309		6,5	1	3	0,4771213
	6,2	3	6	0,7781513		6,8	1	2	0,30103
	6,3	1	3	0,4771213		7,2	1	1	0
	6,6	1	2	0,30103		1,3	1	1693	3,228657
	6,9	1	1	0		1,4	1	1692	3,2284004
	27	1,6	1	3831		3,5833122	1,6	2	1691
1,9		3	3830	3,5831988	1,7	3	1689	3,2276296	
2		8	3827	3,5828585	1,8	6	1686	3,2268576	
2,1		8	3819	3,5819497	1,9	2	1680	3,2253093	
2,2		20	3811	3,5810389	2	6	1678	3,224792	
2,3		43	3791	3,5787538	2,1	11	1672	3,2232363	
2,4		43	3748	3,5737996	2,2	12	1661	3,2203696	
2,5		68	3705	3,5687882	2,3	14	1649	3,2172207	
2,6		98	3637	3,5607433	2,4	18	1635	3,2135178	
2,7		142	3539	3,5488806	2,5	24	1617	3,20871	
2,8		153	3397	3,5310955	2,6	29	1593	3,2022158	
2,9		170	3244	3,5110808	2,7	32	1564	3,1942367	
3		211	3074	3,4877039	2,8	47	1532	3,1852588	
3,1		229	2863	3,4568213	2,9	52	1485	3,1717265	
3,2		211	2634	3,4206158	3	64	1433	3,1562462	
3,3		280	2423	3,3843534	28	3,1	68	1369	3,1364034
3,4		224	2143	3,3310222	3,2	74	1301	3,1142773	
3,5		201	1919	3,283075	3,3	96	1227	3,0888446	
3,6		205	1718	3,2350232	3,4	90	1131	3,0534626	
3,7		215	1513	3,1798389	3,5	96	1041	3,0174507	
3,8		180	1298	3,1132747	3,6	80	945	2,9754318	
3,9		168	1118	3,0484418	3,7	79	865	2,9370161	
4		135	950	2,9777236	3,8	70	786	2,8954225	
4,1		114	815	2,9111576	3,9	66	716	2,854913	
4,2		107	701	2,845718	4	68	650	2,8129134	
4,3		100	594	2,7737864	4,1	60	582	2,764923	
4,4		90	494	2,6937269	4,2	61	522	2,7176705	
4,5		68	404	2,6063814	4,3	55	461	2,6637009	
4,6		72	336	2,5263393	4,4	49	406	2,608526	
4,7		53	264	2,4216039	4,5	34	357	2,5526682	
4,8		46	211	2,3242825	4,6	47	323	2,5092025	
4,9	43	165	2,2174839	4,7	54	276	2,4409091		
5	34	122	2,0863598	4,8	46	222	2,346353		



**Lampiran 2. Struktur Data Akhir per Grid Wilayah Penelitian (Lanjutan 3)**

Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
28	4,9	44	176	2,2455127	29	5,1	19	77	1,8864907
	5	38	132	2,1205739		5,2	17	58	1,763428
	5,1	26	94	1,9731279		5,3	10	41	1,6127839
	5,2	22	68	1,8325089		5,4	4	31	1,4913617
	5,3	11	46	1,6627578		5,5	7	27	1,4313638
	5,4	4	35	1,544068		5,6	7	20	1,30103
	5,5	6	31	1,4913617		5,7	5	13	1,1139434
	5,6	3	25	1,39794		5,8	1	8	0,90309
	5,7	3	22	1,3424227		6	4	7	0,845098
	5,8	3	19	1,2787536		6,1	1	3	0,4771213
	5,9	4	16	1,20412		6,2	1	2	0,30103
	6	3	12	1,0791812		6,9	1	1	0
	6,1	2	9	0,9542425		1,4	1	736	2,8668778
	6,3	2	7	0,845098		1,5	1	735	2,8662873
6,5	1	5	0,69897	1,6	4	734	2,8656961		
6,6	1	4	0,60206	1,7	5	730	2,8633229		
6,9	1	3	0,4771213	1,8	8	725	2,860338		
7,5	1	2	0,30103	1,9	9	717	2,8555192		
7,9	1	1	0	2	18	708	2,8500333		
29	2,1	1	1643	3,2156376	2,1	14	690	2,8388491	
	2,2	2	1642	3,2153732	2,2	16	676	2,8299467	
	2,3	2	1640	3,2148438	2,3	27	660	2,8195439	
	2,4	10	1638	3,2143139	2,4	30	633	2,8014037	
	2,5	6	1628	3,2116544	2,5	29	603	2,7803173	
	2,6	14	1622	3,2100508	2,6	24	574	2,7589119	
	2,7	17	1608	3,206286	2,7	25	550	2,7403627	
	2,8	20	1591	3,2016702	2,8	24	525	2,7201593	
	2,9	32	1571	3,1961762	2,9	36	501	2,6998377	
	3	39	1539	3,1872386	3	32	465	2,667453	
	3,1	66	1500	3,1760913	3,1	29	433	2,6364879	
	3,2	74	1434	3,1565492	3,2	35	404	2,6063814	
	3,3	75	1360	3,1335389	3,3	30	369	2,5670264	
	3,4	71	1285	3,1089031	3,4	25	339	2,5301997	
	3,5	108	1214	3,0842187	3,5	32	314	2,4969296	
	3,6	90	1106	3,0437551	3,6	21	282	2,4502491	
	3,7	79	1016	3,0068937	3,7	23	261	2,4166405	
	3,8	82	937	2,9717396	3,8	15	238	2,376577	
	3,9	81	855	2,9319661	3,9	28	223	2,3483049	
	4	77	774	2,888741	4	18	195	2,2900346	
	4,1	78	697	2,8432328	4,1	24	177	2,2479733	
	4,2	82	619	2,7916906	4,2	16	153	2,1846914	
	4,3	84	537	2,7299743	4,3	18	137	2,1367206	
	4,4	68	453	2,6560982	4,4	21	119	2,075547	
	4,5	63	385	2,5854607	4,5	15	98	1,9912261	
	4,6	77	322	2,5078559	4,6	22	83	1,9190781	
4,7	50	245	2,3891661	4,7	13	61	1,7853298		
4,8	49	195	2,2900346	4,8	12	48	1,6812412		
4,9	43	146	2,1643529	4,9	14	36	1,5563025		
5	26	103	2,0128372	5	7	22	1,3424227		

**Lampiran 2. Struktur Data Akhir per Grid Wilayah Penelitian (Lanjutan 4)**

Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
30	5,1	4	15	1,1760913	32	5,2	25	86	1,9344985
	5,2	2	11	1,0413927		5,3	14	61	1,7853298
	5,3	1	9	0,9542425		5,4	11	47	1,6720979
	5,4	1	8	0,90309		5,5	7	36	1,5563025
	5,5	2	7	0,845098		5,6	6	29	1,462398
	5,6	2	5	0,69897		5,7	6	23	1,3617278
	5,7	1	3	0,4771213		5,8	2	17	1,2304489
	5,8	1	2	0,30103		5,9	5	15	1,1760913
	5,9	1	1	0		6,1	1	10	1
1	2	2636	3,4209454	6,2	2	9	0,9542425		
1,1	5	2634	3,4206158	6,3	2	7	0,845098		
1,2	11	2629	3,4197906	6,4	3	5	0,69897		
1,3	9	2618	3,4179696	6,7	1	2	0,30103		
1,4	12	2609	3,4164741	7,1	1	1	0		
1,5	7	2597	3,4144719	2,4	1	113	2,0530784		
1,6	10	2590	3,4132998	2,5	1	112	2,049218		
1,7	13	2580	3,4116197	2,6	2	111	2,045323		
1,8	7	2567	3,4094259	2,7	3	109	2,0374265		
1,9	12	2560	3,40824	2,8	5	106	2,0253059		
2	17	2548	3,4061994	2,9	3	101	2,0043214		
2,1	10	2531	3,4032921	3	4	98	1,9912261		
2,2	18	2521	3,4015728	3,1	3	94	1,9731279		
2,3	20	2503	3,3984608	3,2	8	91	1,9590414		
2,4	23	2483	3,3949767	3,3	6	83	1,9190781		
2,5	35	2460	3,3909351	3,4	5	77	1,8864907		
2,6	42	2425	3,3847117	3,5	13	72	1,8573325		
2,7	66	2383	3,377124	3,6	3	59	1,770852		
2,8	83	2317	3,364926	3,7	9	56	1,748188		
2,9	92	2234	3,3490832	3,8	4	47	1,6720979		
3	121	2142	3,3308195	3,9	2	43	1,6334685		
3,1	135	2021	3,3055663	4	2	41	1,6127839		
3,2	113	1886	3,2755417	4,1	4	39	1,5910646		
3,3	145	1773	3,2487087	4,2	3	35	1,544068		
3,4	141	1628	3,2116544	4,3	6	32	1,50515		
3,5	159	1487	3,172311	4,4	1	26	1,4149733		
3,6	122	1328	3,1231981	4,5	4	25	1,39794		
3,7	126	1206	3,0813473	4,6	5	21	1,3222193		
3,8	111	1080	3,0334238	4,7	2	16	1,20412		
3,9	99	969	2,9863238	4,9	1	14	1,146128		
4	96	870	2,9395193	5	1	13	1,1139434		
4,1	88	774	2,888741	5,1	1	12	1,0791812		
4,2	59	686	2,8363241	5,2	2	11	1,0413927		
4,3	75	627	2,7972675	5,3	3	9	0,9542425		
4,4	71	552	2,7419391	5,6	1	6	0,7781513		
4,5	68	481	2,6821451	5,7	1	5	0,69897		
4,6	60	413	2,6159501	5,8	2	4	0,60206		
4,7	67	353	2,5477747	6,2	1	2	0,30103		
4,8	79	286	2,456366	6,3	1	1	0		
4,9	43	207	2,3159703	3,3	1	48	1,6812412		
5	40	164	2,2148438	3,4	2	47	1,6720979		
5,1	38	124	2,0934217	3,7	1	45	1,6532125		

**Lampiran 2. Struktur Data Akhir per Grid Wilayah Penelitian (Lanjutan 5)**

Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
34	3,8	1	44	1,6434527	35	4,7	3	13	1,1139434
	4	2	43	1,6334685		4,8	2	10	1
	4,1	1	41	1,6127839		4,9	2	8	0,90309
	4,2	2	40	1,60206		5,1	2	6	0,7781513
	4,3	5	38	1,5797836		5,3	2	4	0,60206
	4,4	2	33	1,5185139		5,7	1	2	0,30103
	4,5	2	31	1,4913617	6,6	1	1	0	
	4,6	5	29	1,462398	36	1,6	4	610	2,7853298
	4,7	4	24	1,3802112		1,7	1	606	2,7824726
	4,8	4	20	1,30103		1,8	5	605	2,7817554
	4,9	5	16	1,20412		1,9	6	600	2,7781513
	5	2	11	1,0413927		2	9	594	2,7737864
	5,2	1	9	0,9542425		2,1	6	585	2,7671559
	5,4	1	8	0,90309		2,2	12	579	2,7626786
	5,5	2	7	0,845098		2,3	17	567	2,7535831
	5,7	1	5	0,69897		2,4	26	550	2,7403627
6,1	2	4	0,60206	2,5		25	524	2,7193313	
6,2	1	2	0,30103	2,6		28	499	2,6981005	
6,4	1	1	0	2,7		23	471	2,6730209	
1,4	1	361	2,5575072	2,8		36	448	2,651278	
1,5	1	360	2,5563025	2,9		23	412	2,6148972	
1,7	4	359	2,5550944	3		35	389	2,5899496	
1,8	7	355	2,5502284	3,1		26	354	2,5490033	
1,9	12	348	2,5415792	3,2		19	328	2,5158738	
2	16	336	2,5263393	3,3		30	309	2,4899585	
2,1	12	320	2,50515	3,4		33	279	2,4456042	
2,2	20	308	2,4885507	3,5		20	246	2,3909351	
2,3	19	288	2,4593925	3,6	20	226	2,3541084		
2,4	26	269	2,4297523	3,7	26	206	2,3138672		
2,5	31	243	2,3856063	3,8	22	180	2,2552725		
2,6	26	212	2,3263359	3,9	23	158	2,1986571		
2,7	25	186	2,2695129	4	26	135	2,1303338		
2,8	22	161	2,2068259	4,1	20	109	2,0374265		
2,9	9	139	2,1430148	4,2	18	89	1,94939		
3	22	130	2,1139434	4,3	13	71	1,8512583		
3,1	15	108	2,0334238	4,4	9	58	1,763428		
3,2	7	93	1,9684829	4,5	13	49	1,6901961		
3,3	12	86	1,9344985	4,6	9	36	1,5563025		
3,4	13	74	1,8692317	4,7	6	27	1,4313638		
3,5	11	61	1,7853298	4,8	3	21	1,3222193		
3,6	5	50	1,69897	4,9	4	18	1,2552725		
3,7	2	45	1,6532125	5	2	14	1,146128		
3,8	7	43	1,6334685	5,1	2	12	1,0791812		
3,9	4	36	1,5563025	5,2	1	10	1		
4	5	32	1,50515	5,3	4	9	0,9542425		
4,1	3	27	1,4313638	5,4	1	5	0,69897		
4,2	1	24	1,3802112	5,5	1	4	0,60206		
4,3	4	23	1,3617278	5,6	1	3	0,4771213		
4,4	4	19	1,2787536	5,9	1	2	0,30103		
4,5	1	15	1,1760913	6,6	1	1	0		
4,6	1	14	1,146128						

**Lampiran 2. Struktur Data Akhir per Grid Wilayah Penelitian (Lanjutan 6)**

Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
	1,1	1	3550	3,550228		2,4	1	1450	3,161368
	1,2	2	3549	3,550106		2,5	1	1449	3,161068
	1,3	1	3547	3,549861		2,6	1	1448	3,160769
	1,4	2	3546	3,549739		2,7	6	1447	3,160469
	1,5	9	3544	3,549494		2,8	10	1441	3,158664
	1,6	7	3535	3,548389		2,9	17	1431	3,155564
	1,7	18	3528	3,547529		3	17	1414	3,150449
	1,8	26	3510	3,545307		3,1	33	1397	3,145196
	1,9	41	3484	3,542078		3,2	47	1364	3,134814
	2	64	3443	3,536937		3,3	42	1317	3,119586
	2,1	81	3379	3,528788		3,4	62	1275	3,10551
	2,2	98	3298	3,518251		3,5	44	1213	3,083861
	2,3	104	3200	3,50515		3,6	68	1169	3,067815
	2,4	124	3096	3,490801		3,7	54	1101	3,041787
	2,5	133	2972	3,473049		3,8	84	1047	3,019947
	2,6	146	2839	3,453165		3,9	72	963	2,983626
	2,7	140	2693	3,430236		4	68	891	2,949878
	2,8	145	2553	3,407051		4,1	84	823	2,9154
	2,9	161	2408	3,381656	38	4,2	102	739	2,868644
	3	145	2247	3,351603		4,3	84	637	2,804139
	3,1	143	2102	3,322633		4,4	76	553	2,742725
	3,2	173	1959	3,292034		4,5	78	477	2,678518
	3,3	153	1786	3,251881		4,6	85	399	2,600973
	3,4	148	1633	3,212986		4,7	84	314	2,49693
	3,5	143	1485	3,171726		4,8	48	230	2,361728
	3,6	142	1342	3,127753		4,9	56	182	2,260071
37	3,7	149	1200	3,079181		5	40	126	2,100371
	3,8	121	1051	3,021603		5,1	22	86	1,934498
	3,9	109	930	2,968483		5,2	17	64	1,80618
	4	124	821	2,914343		5,3	13	47	1,672098
	4,1	98	697	2,843233		5,4	12	34	1,531479
	4,2	90	599	2,777427		5,5	5	22	1,342423
	4,3	90	509	2,706718		5,6	6	17	1,230449
	4,4	72	419	2,622214		5,7	4	11	1,041393
	4,5	64	347	2,540329		5,8	2	7	0,845098
	4,6	66	283	2,451786		5,9	3	5	0,69897
	4,7	60	217	2,33646		6	1	2	0,30103
	4,8	37	157	2,1959		6,3	1	1	0
	4,9	29	120	2,079181		2	1	702	2,8463371
	5	21	91	1,959041		2,1	1	701	2,845718
	5,1	20	70	1,845098		2,3	2	700	2,845098
	5,2	11	50	1,69897		2,4	2	698	2,8438554
	5,3	6	39	1,591065		2,5	1	696	2,8426092
	5,4	6	33	1,518514		2,6	5	695	2,8419848
	5,5	5	27	1,431364		2,7	4	690	2,8388491
	5,6	6	22	1,342423	39	2,8	9	686	2,8363241
	5,7	4	16	1,20412		2,9	8	677	2,8305887
	5,8	1	12	1,079181		3	7	669	2,8254261
	5,9	1	11	1,041393		3,1	19	662	2,820858
	6	6	10	1		3,2	16	643	2,808211
	6,1	2	4	0,60206		3,3	18	627	2,7972675
	6,6	1	2	0,30103		3,4	25	609	2,7846173
	6,8	1	1	0		3,5	36	584	2,7664128

**Lampiran 2. Struktur Data Akhir per Grid Wilayah Penelitian (Lanjutan 7)**

Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
39	3,6	28	548	2,7387806	40	5	5	26	1,414973
	3,7	33	520	2,7160033		5,1	5	21	1,322219
	3,8	41	487	2,687529		5,2	3	16	1,20412
	3,9	52	446	2,6493349		5,3	4	13	1,113943
	4	33	394	2,5954962		5,4	3	9	0,954243
	4,1	35	361	2,5575072		5,5	2	6	0,778151
	4,2	32	326	2,5132176		5,6	1	4	0,60206
	4,3	36	294	2,4683473		5,7	1	3	0,477121
	4,4	43	258	2,4116197		6,1	1	2	0,30103
	4,5	40	215	2,3324385		6,2	1	1	0
	4,6	33	175	2,243038	1,4	1	4675	3,669782	
	4,7	34	142	2,1522883	1,6	1	4674	3,669689	
	4,8	33	108	2,0334238	1,7	1	4673	3,669596	
	4,9	17	75	1,8750613	1,8	7	4672	3,669503	
	5	24	58	1,763428	1,9	7	4665	3,668852	
	5,1	14	34	1,5314789	2	10	4658	3,6682	
	5,2	7	20	1,30103	2,1	17	4648	3,667266	
5,3	4	13	1,1139434	2,2	39	4631	3,665675		
5,4	1	9	0,9542425	2,3	50	4592	3,662002		
5,5	4	8	0,90309	2,4	82	4542	3,657247		
5,6	2	4	0,60206	2,5	103	4460	3,649335		
6,1	1	2	0,30103	2,6	126	4357	3,639188		
7,2	1	1	0	2,7	171	4231	3,626443		
40	1,6	1	448	2,651278	2,8	207	4060	3,608526	
	2	1	447	2,650308	2,9	246	3853	3,585799	
	2,2	3	446	2,649335	3	253	3607	3,557146	
	2,3	1	443	2,646404	3,1	302	3354	3,525563	
	2,4	1	442	2,645422	3,2	278	3052	3,484585	
	2,5	5	441	2,644439	3,3	318	2774	3,443107	
	2,6	5	436	2,639487	3,4	283	2456	3,390228	
	2,7	8	431	2,634477	3,5	253	2173	3,33706	
	2,8	19	423	2,62634	3,6	292	1920	3,283301	
	2,9	13	404	2,606381	3,7	241	1628	3,211654	
	3	14	391	2,592177	3,8	207	1387	3,142077	
	3,1	16	377	2,576341	3,9	200	1180	3,071882	
	3,2	18	361	2,557507	4	156	980	2,991226	
	3,3	25	343	2,535294	4,1	110	824	2,915927	
	3,4	20	318	2,502427	4,2	103	714	2,853698	
	3,5	23	298	2,474216	4,3	102	611	2,786041	
	3,6	14	275	2,439333	4,4	91	509	2,706718	
3,7	22	261	2,416641	4,5	53	418	2,621176		
3,8	23	239	2,378398	4,6	79	365	2,562293		
3,9	16	216	2,334454	4,7	78	286	2,456366		
4	14	200	2,30103	4,8	51	208	2,318063		
4,1	10	186	2,269513	4,9	48	157	2,1959		
4,2	17	176	2,245513	5	34	109	2,037427		
4,3	18	159	2,201397	5,1	19	75	1,875061		
4,4	16	141	2,149219	5,2	22	56	1,748188		
4,5	20	125	2,09691	5,3	9	34	1,531479		
4,6	18	105	2,021189	5,4	8	25	1,39794		
4,7	23	87	1,939519	5,5	3	17	1,230449		
4,8	18	64	1,80618	5,6	1	14	1,146128		
4,9	20	46	1,662758	5,7	3	13	1,113943		

**Lampiran 2. Struktur Data Akhir per Grid Wilayah Penelitian (Lanjutan 8)**

Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
43	5,8	3	10	1	44	1,3	1	7405	3,869525
	5,9	1	7	0,845098		1,5	5	7404	3,869466
	6	1	6	0,778151		1,6	10	7399	3,869173
	6,1	1	5	0,69897		1,7	18	7389	3,868586
	6,2	1	4	0,60206		1,8	31	7371	3,867526
	6,5	2	3	0,477121		1,9	47	7340	3,865696
	6,6	1	1	0		2	86	7293	3,862906
1,2	1	2044	3,310481	2,1	156	7207	3,857755		
1,7	3	2043	3,310268	2,2	184	7051	3,848251		
1,8	2	2040	3,30963	2,3	257	6867	3,836767		
1,9	7	2038	3,309204	2,4	306	6610	3,820202		
2	20	2031	3,30771	2,5	395	6304	3,799616		
2,1	32	2011	3,303412	2,6	405	5909	3,771514		
2,2	46	1979	3,296446	2,7	493	5504	3,740678		
2,3	46	1933	3,286232	2,8	446	5011	3,699924		
2,4	68	1887	3,275772	2,9	432	4565	3,659441		
2,5	78	1819	3,259833	3	443	4133	3,616265		
2,6	102	1741	3,240799	3,1	420	3690	3,567026		
2,7	104	1639	3,214579	3,2	343	3270	3,514548		
2,8	117	1535	3,186108	3,3	345	2927	3,466423		
2,9	136	1418	3,151676	3,4	362	2582	3,411956		
3	132	1282	3,107888	3,5	286	2220	3,346353		
3,1	135	1150	3,060698	3,6	271	1934	3,286457		
3,2	132	1015	3,006466	3,7	237	1663	3,220892		
3,3	127	883	2,945961	3,8	202	1426	3,15412		
3,4	111	756	2,878522	3,9	207	1224	3,087781		
3,5	116	645	2,80956	45	4	161	1017	3,007321	
3,6	77	529	2,723456	4,1	158	856	2,932474		
3,7	68	452	2,655138	4,2	111	698	2,843855		
3,8	66	384	2,584331	4,3	93	587	2,768638		
3,9	47	318	2,502427	4,4	97	494	2,693727		
4	39	271	2,432969	4,5	85	397	2,598791		
4,1	43	232	2,365488	4,6	70	312	2,494155		
4,2	22	189	2,276462	4,7	62	242	2,383815		
4,3	21	167	2,222717	4,8	47	180	2,255273		
4,4	28	146	2,164353	4,9	39	133	2,123852		
4,5	20	118	2,071882	5	22	94	1,973128		
4,6	17	98	1,991226	5,1	22	72	1,857333		
4,7	14	81	1,908485	5,2	14	50	1,69897		
4,8	15	67	1,826075	5,3	7	36	1,556303		
4,9	11	52	1,716003	5,4	7	29	1,462398		
5	13	41	1,612784	5,5	4	22	1,342423		
5,1	6	28	1,447158	5,6	2	18	1,255273		
5,2	4	22	1,342423	5,7	3	16	1,20412		
5,3	4	18	1,255273	5,8	1	13	1,113943		
5,4	3	14	1,146128	5,9	2	12	1,079181		
5,5	1	11	1,041393	6,2	3	10	1		
5,7	1	10	1	6,3	1	7	0,845098		
5,8	2	9	0,954243	6,4	2	6	0,778151		
5,9	1	7	0,845098	6,7	1	4	0,60206		
6	3	6	0,778151	6,8	1	3	0,477121		
6,1	2	3	0,477121	6,9	1	2	0,30103		
6,2	1	1	0	7	1	1	0		

**Lampiran 2. Struktur Data Akhir per Grid Wilayah Penelitian (Lanjutan 9)**

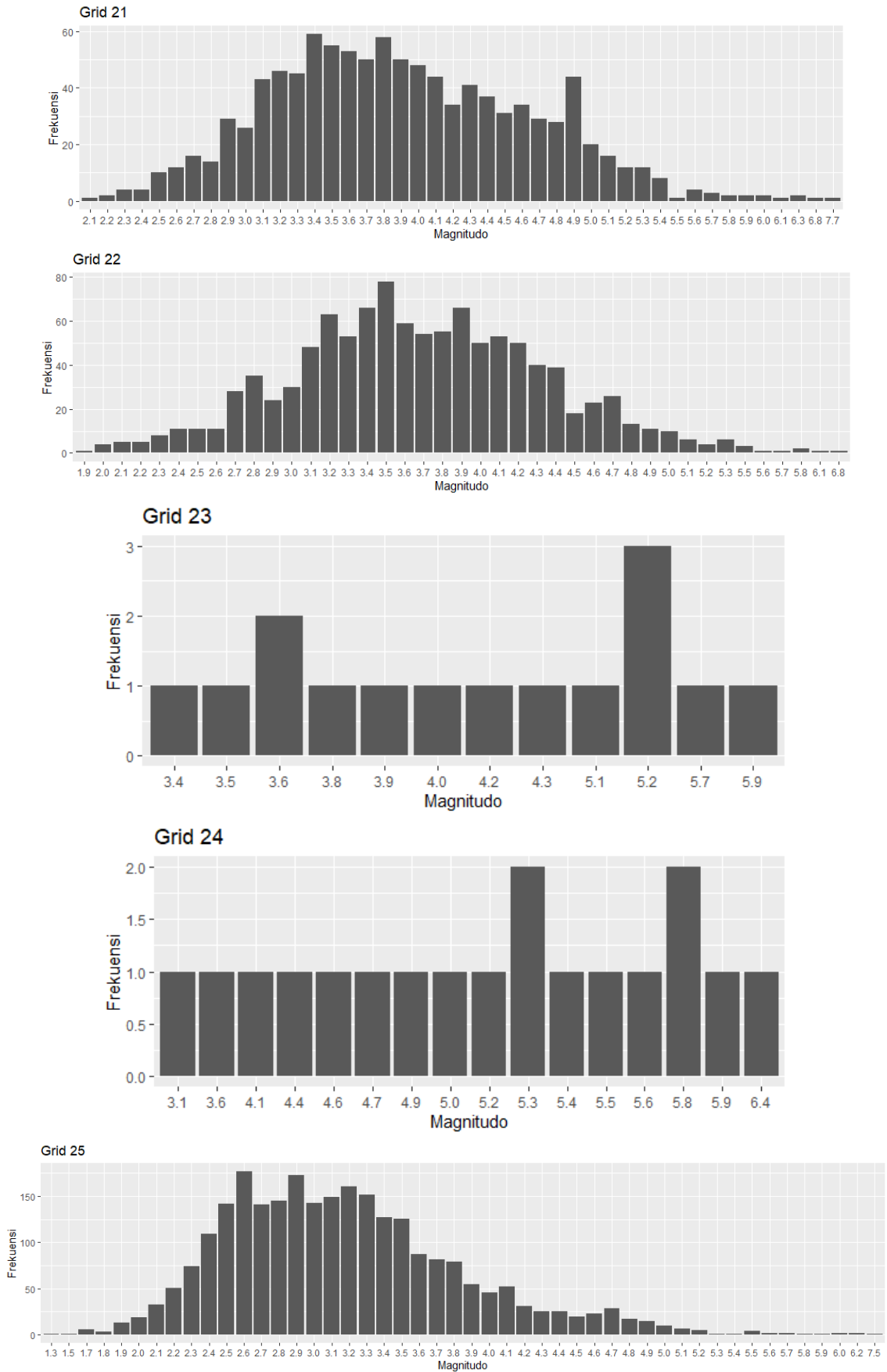
Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
	1	3	2965	3,472025	46	6,8	1	2	0,30103
	1,1	1	2962	3,471585		7,3	1	1	0
	1,2	1	2961	3,471438		2,1	1	2143	3,3310222
	1,3	2	2960	3,471292		2,2	2	2142	3,3308195
	1,4	1	2958	3,470998		2,4	1	2140	3,3304138
	1,5	1	2957	3,470851		2,5	4	2139	3,3302108
	1,6	3	2956	3,470704		2,6	5	2135	3,3293979
	1,7	3	2953	3,470263		2,7	1	2130	3,3283796
	1,8	1	2950	3,469822		2,8	2	2129	3,3281757
	1,9	1	2949	3,469675		2,9	4	2127	3,3277675
	2	8	2948	3,469528		3	6	2123	3,32695
	2,1	7	2940	3,468347		3,1	1	2117	3,3257209
	2,2	22	2933	3,467312		3,2	5	2116	3,3255157
	2,3	31	2911	3,464042		3,3	3	2111	3,3244882
	2,4	58	2880	3,459393		3,4	4	2108	3,3238706
	2,5	61	2822	3,450557		3,5	6	2104	3,3230457
	2,6	89	2761	3,441066		3,6	8	2098	3,3218055
	2,7	106	2672	3,426837		3,7	19	2090	3,3201463
	2,8	134	2566	3,409257		3,8	24	2071	3,3161801
	2,9	178	2432	3,385964		3,9	38	2047	3,3111178
	3	180	2254	3,352954		4	73	2009	3,3029799
	3,1	174	2074	3,316809		4,1	109	1936	3,2869054
	3,2	173	1900	3,278754		4,2	148	1827	3,2617385
	3,3	185	1727	3,237292		4,3	200	1679	3,2250507
	3,4	167	1542	3,188084		4,4	220	1479	3,1699682
	3,5	177	1375	3,138303	47	4,5	248	1259	3,1000257
46	3,6	152	1198	3,078457		4,6	260	1011	3,0047512
	3,7	146	1046	3,019532		4,7	222	751	2,8756399
	3,8	115	900	2,954243		4,8	180	529	2,7234557
	3,9	125	785	2,89487		4,9	99	349	2,5428254
	4	111	660	2,819544		5	67	250	2,39794
	4,1	96	549	2,739572		5,1	72	183	2,2624511
	4,2	79	453	2,656098		5,2	21	111	2,045323
	4,3	62	374	2,572872		5,3	20	90	1,9542425
	4,4	63	312	2,494155		5,4	16	70	1,845098
	4,5	49	249	2,396199		5,5	17	54	1,7323938
	4,6	41	200	2,30103		5,6	11	37	1,5682017
	4,7	46	159	2,201397		5,7	3	26	1,4149733
	4,8	26	113	2,053078		5,8	4	23	1,3617278
	4,9	24	87	1,939519		5,9	2	19	1,2787536
	5	16	63	1,799341		6	2	17	1,2304489
	5,1	11	47	1,672098		6,1	2	15	1,1760913
	5,2	9	36	1,556303		6,2	2	13	1,1139434
	5,3	1	27	1,431364		6,3	1	11	1,0413927
	5,4	5	26	1,414973		6,4	3	10	1
	5,5	9	21	1,322219		6,5	2	7	0,845098
	5,6	1	12	1,079181		6,7	1	5	0,69897
	5,8	1	11	1,041393		6,8	1	4	0,60206
	5,9	1	10	1		6,9	1	3	0,4771213
	6	2	9	0,954243		7,3	2	2	0,30103
	6,3	2	7	0,845098	48	3,1	1	925	2,966142
	6,4	1	5	0,69897		3,3	2	924	2,965672
	6,7	2	4	0,60206		3,4	2	922	2,964731

**Lampiran 2. Struktur Data Akhir per Grid Wilayah Penelitian (Lanjutan 10)**

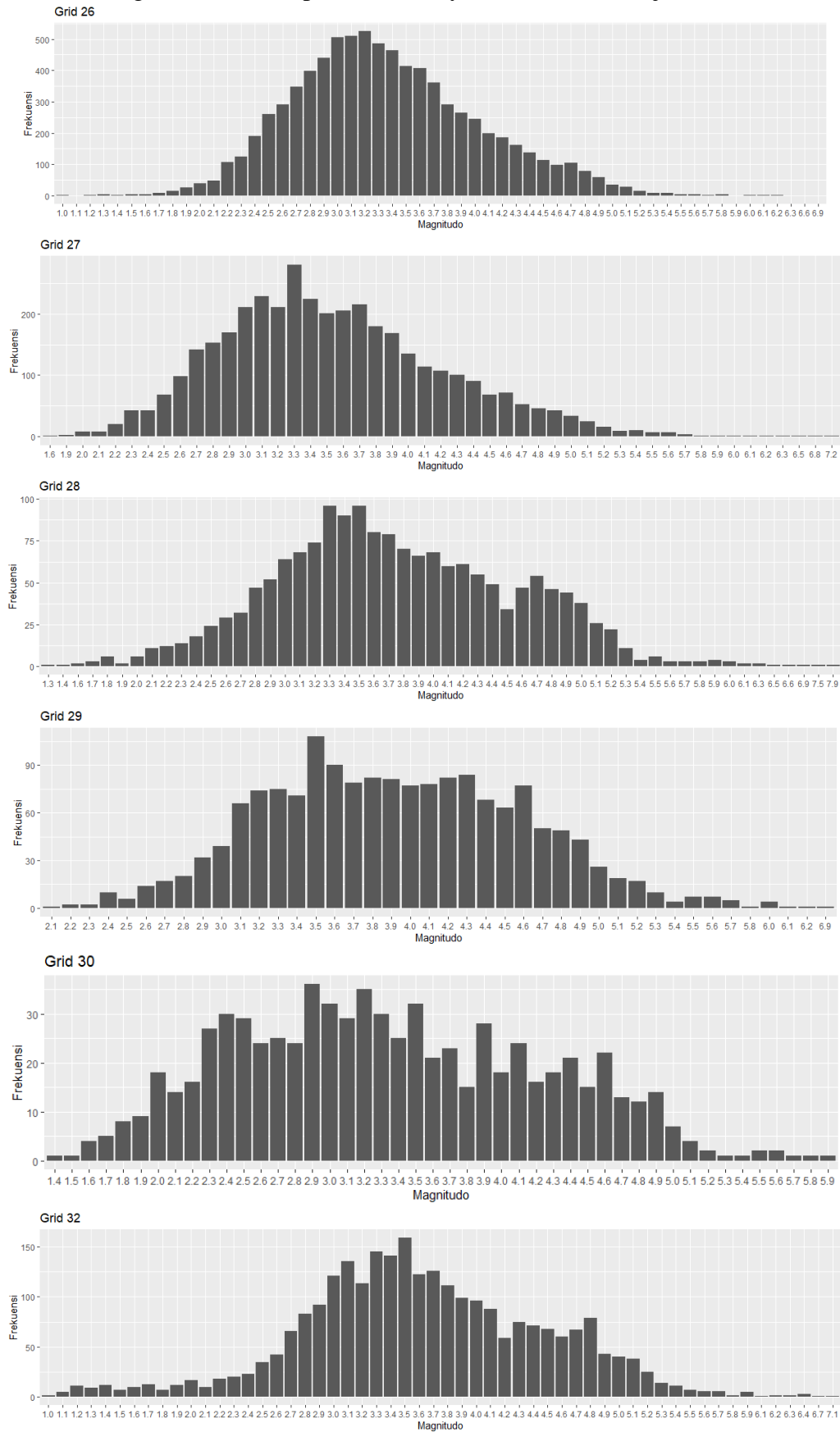
Grid	M	n	N	Log(N)	Grid	M	n	N	Log(N)
	3,5	2	920	2,963788		2,3	23	1801	3,2555137
	3,6	5	918	2,962843		2,4	39	1778	3,2499318
	3,7	9	913	2,960471		2,5	51	1739	3,2402996
	3,8	10	904	2,956168		2,6	61	1688	3,2273724
	3,9	22	894	2,951338		2,7	63	1627	3,2113876
	4	25	872	2,940516		2,8	84	1564	3,1942367
	4,1	47	847	2,927883		2,9	99	1480	3,1702617
	4,2	47	800	2,90309		3	97	1381	3,1401937
	4,3	65	753	2,876795		3,1	117	1284	3,108565
	4,4	89	688	2,837588		3,2	102	1167	3,0670709
	4,5	90	599	2,777427		3,3	85	1065	3,0273496
	4,6	104	509	2,706718		3,4	103	980	2,9912261
	4,7	102	405	2,607455		3,5	90	877	2,9429996
48	4,8	87	303	2,481443		3,6	95	787	2,8959747
	4,9	66	216	2,334454		3,7	90	692	2,8401061
	5	47	150	2,176091		3,8	63	602	2,7795965
	5,1	33	103	2,012837		3,9	74	539	2,7315888
	5,2	19	70	1,845098		4	62	465	2,667453
	5,3	16	51	1,70757		4,1	69	403	2,605305
	5,4	5	35	1,544068	56	4,2	46	334	2,5237465
	5,5	8	30	1,477121		4,3	45	288	2,4593925
	5,6	6	22	1,342423		4,4	29	243	2,3856063
	5,7	6	16	1,20412		4,5	38	214	2,3304138
	5,8	2	10	1		4,6	33	176	2,2455127
	5,9	3	8	0,90309		4,7	23	143	2,155336
	6	3	5	0,69897		4,8	26	120	2,0791812
	6,3	1	2	0,30103		4,9	28	94	1,9731279
	7,2	1	1	0		5	23	66	1,8195439
49	5,7	1	1	0		5,1	16	43	1,6334685
	4,3	1	7	0,845098		5,2	7	27	1,4313638
	4,5	2	6	0,7781513		5,3	6	20	1,30103
50	4,6	1	4	0,60206		5,4	1	14	1,146128
	4,8	1	3	0,4771213		5,5	3	13	1,1139434
	4,9	1	2	0,30103		5,6	2	10	1
	5	1	1	0		5,7	3	8	0,90309
	1,8	2	1840	3,2648178		5,8	2	5	0,69897
	1,9	3	1838	3,2643455		5,9	1	3	0,4771213
56	2	9	1835	3,2636361		6	1	2	0,30103
	2,1	3	1826	3,2615008		6,2	1	1	0
	2,2	22	1823	3,2607867					



### Lampiran 3. Histogram Frekuensi per Grid Wilayah Penelitian

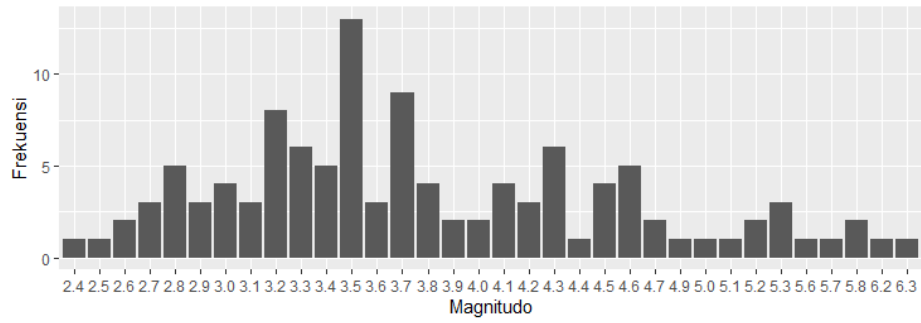


### Lampiran 3. Histogram Frekuensi per Grid Wilayah Penelitian (Lanjutan)

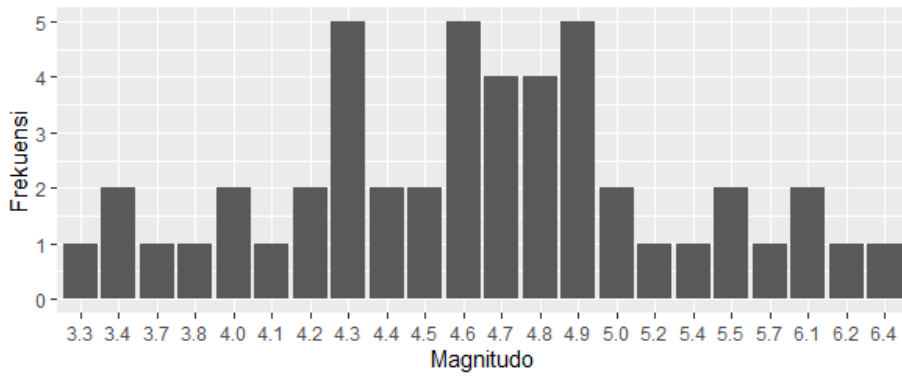


**Lampiran 3. Histogram Frekuensi per Grid Wilayah Penelitian (Lanjutan 2)**

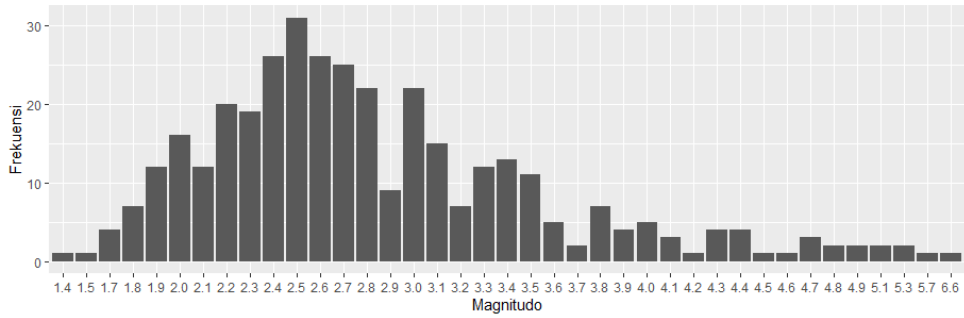
**Grid 33**



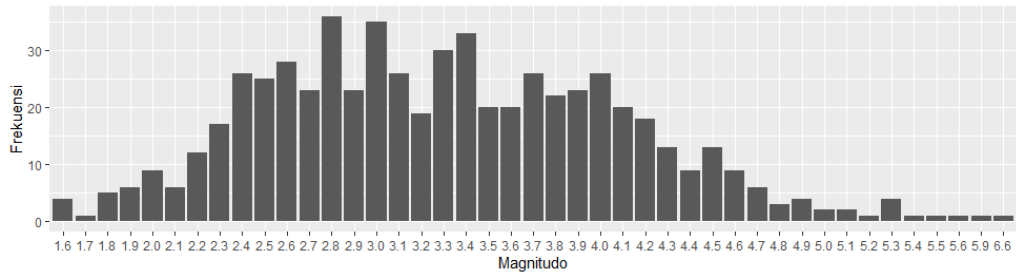
**Grid 34**



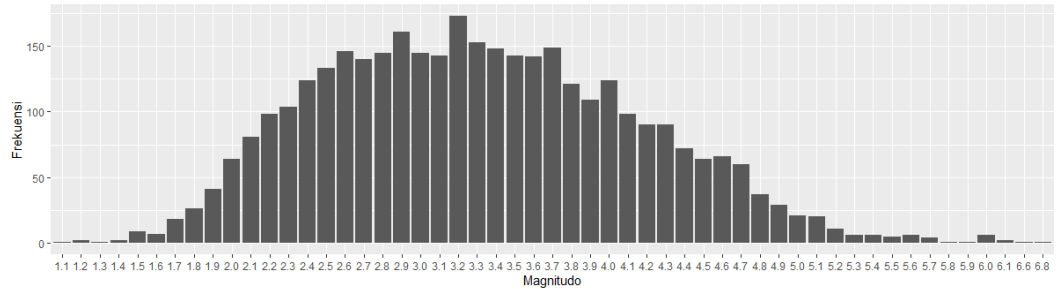
**Grid 35**



**Grid 36**

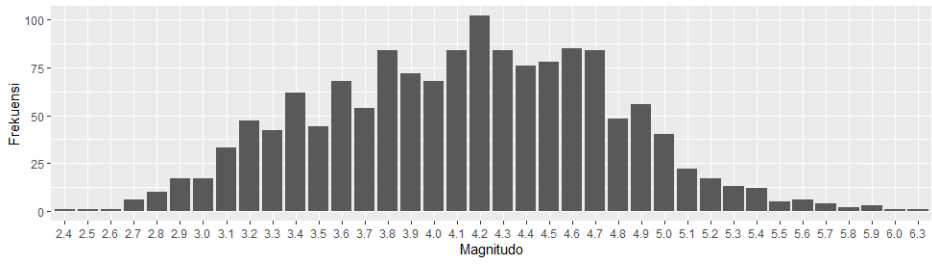


**Grid 37**

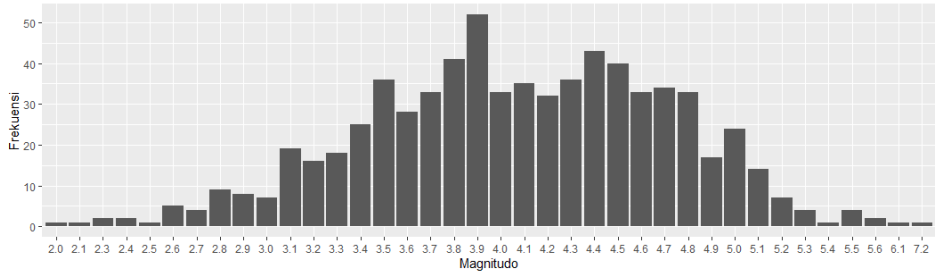


### Lampiran 3. Histogram Frekuensi per Grid Wilayah Penelitian (Lanjutan 3)

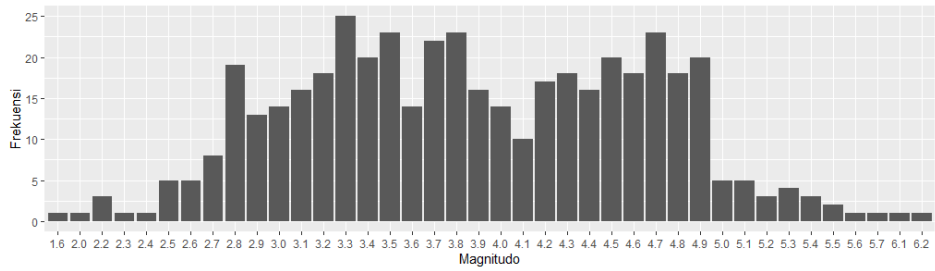
Grid 38



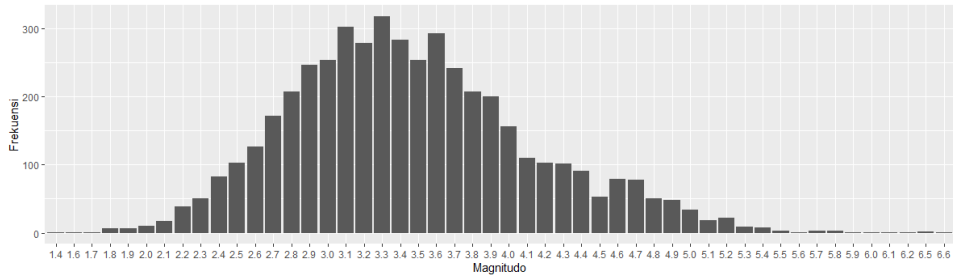
Grid 39



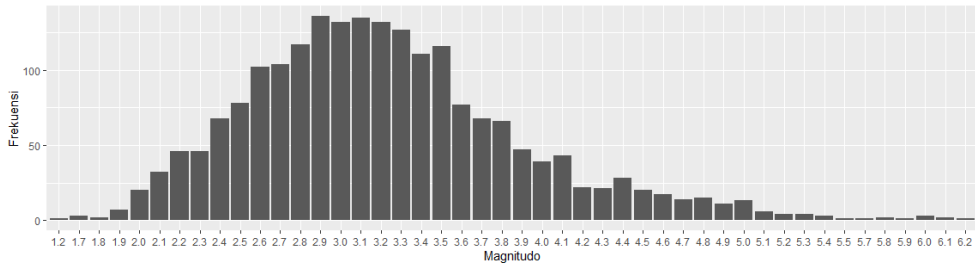
Grid 40



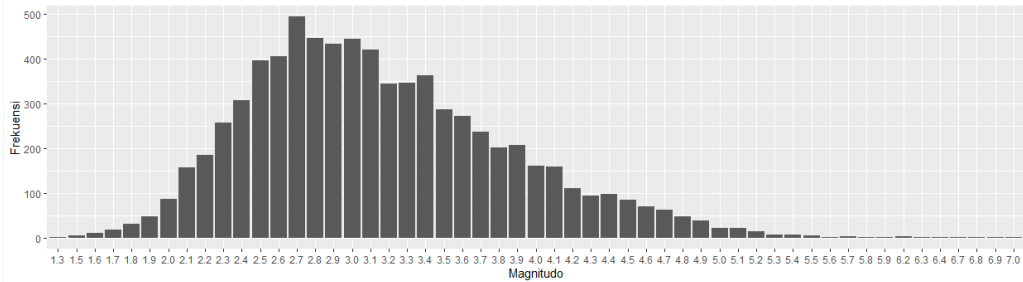
Grid 43



Grid 44

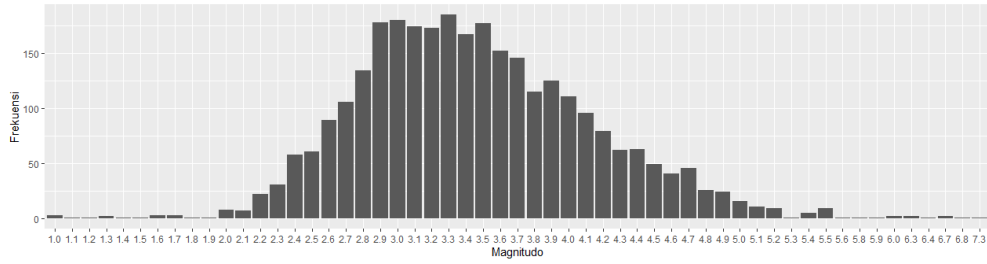


Grid 45

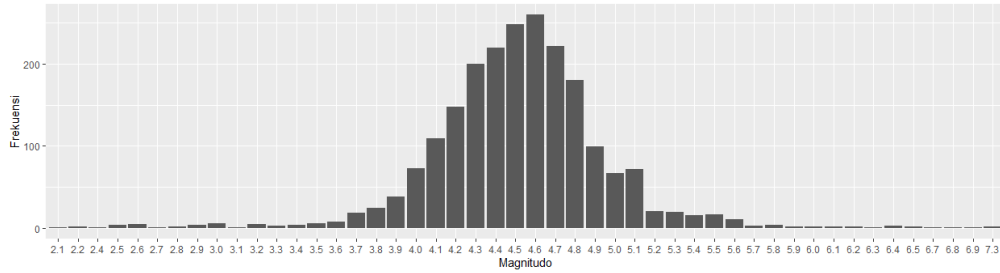


### Lampiran 3. Histogram Frekuensi per Grid Wilayah Penelitian (Lanjutan 3)

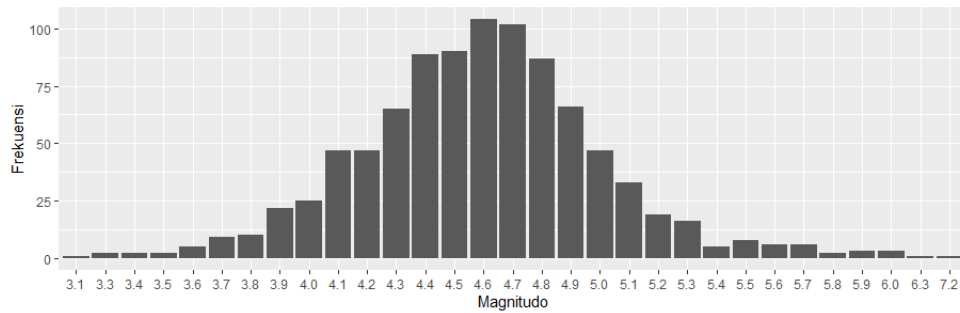
Grid 46



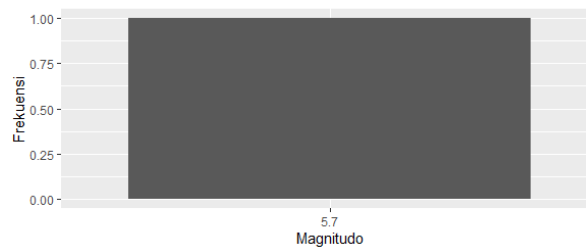
Grid 47



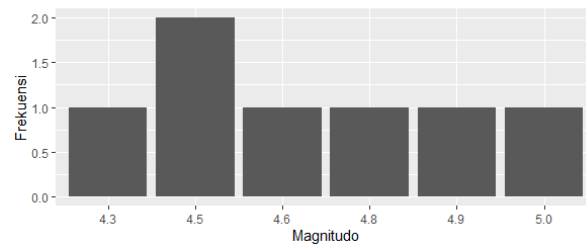
Grid 48



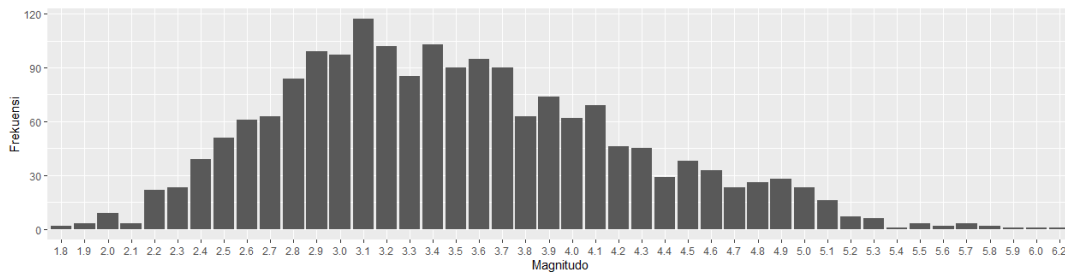
Grid 49



Grid 50



Grid 56



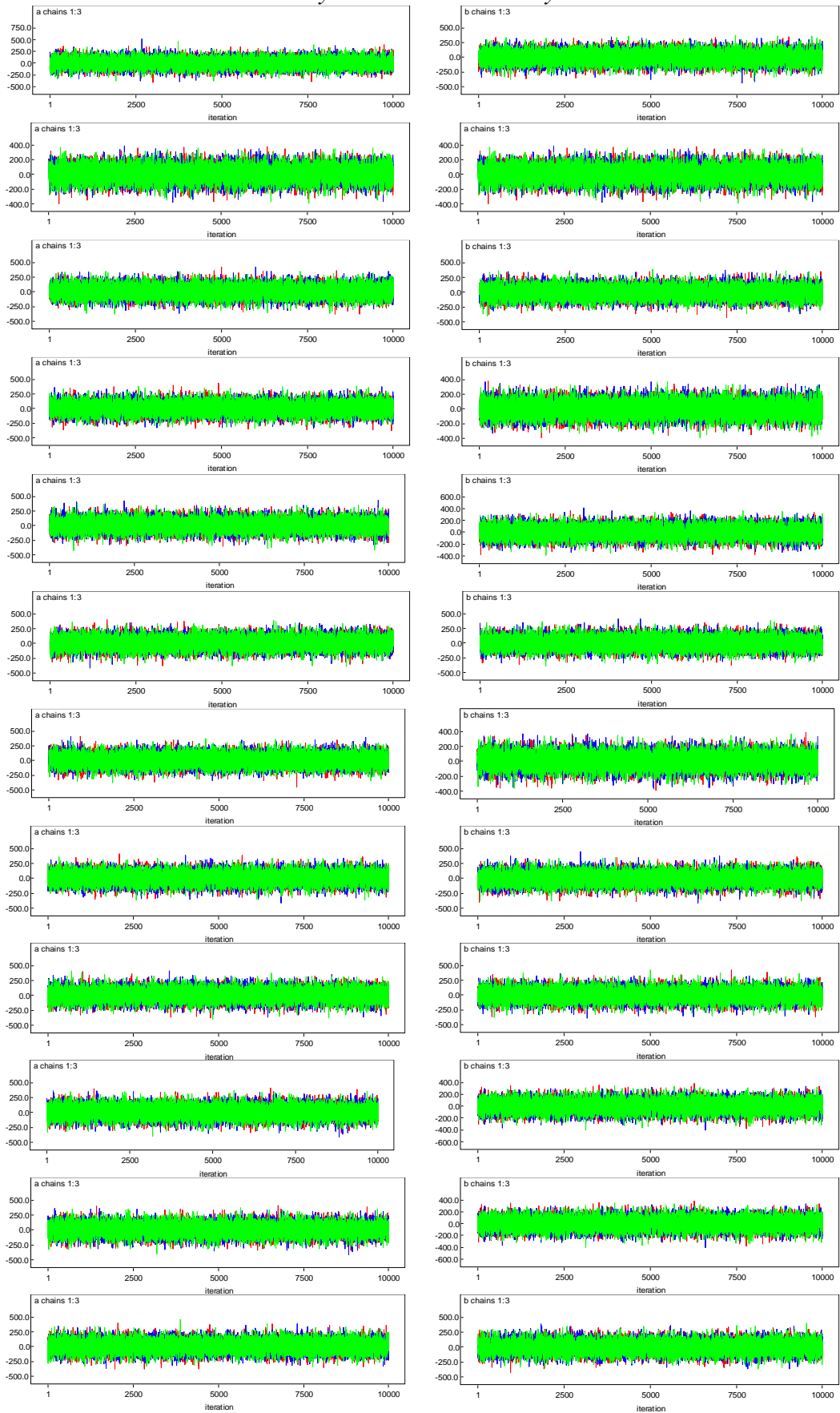
**Lampiran 4. Hasil Output Pemodelan Regresi**

<b>Grid</b>		<b>Coefficients</b>	<b>Standard Error</b>	<b>t Stat</b>	<b>P-value</b>
1	Konstanta (a)	4,913696543	0,163424404	30,06709174	1,65984E-30
	b	-0,65056245	0,041280256	-15,7596514	1,77752E-19
3	Konstanta (a)	3,33808342	0,953146362	3,502172963	0,072746624
	b	-0,51162916	0,162545549	-3,14760488	0,08783913
5	Konstanta (a)	3,721524814	0,138347772	26,8997813	9,32072E-18
	b	-0,53125764	0,031410244	-16,9135153	1,03998E-13
7	Konstanta (a)	5,718131582	0,202596864	28,224186	1,08131E-30
	b	-0,70001416	0,042401551	-16,509164	5,89955E-21
11	Konstanta (a)	4,983936631	0,135678315	36,73347975	7,17198E-39
	b	-0,59603431	0,032217891	-18,5001031	1,57494E-24
12	Konstanta (a)	3,75871131	0,100511057	37,39599825	4,31276E-26
	b	-0,58610906	0,026115224	-22,4431953	7,06573E-20
13	Konstanta (a)	2,702848034	0,206398852	13,0952668	1,09898E-06
	b	-0,40374129	0,04138835	-9,75495017	1,02124E-05
14	Konstanta (a)	1,980790668	0,228201063	8,680023844	5,39488E-05
	b	-0,26975938	0,045587564	-5,91738975	0,000589062
15	Konstanta (a)	4,038956383	0,094871505	42,57291339	9,70259E-32
	b	-0,57404069	0,022597977	-25,4023042	3,86214E-24
16	Konstanta (a)	5,058887566	0,133453654	37,90744876	1,48012E-39
	b	-0,63784312	0,032791146	-19,451687	1,60309E-25
17	Konstanta (a)	5,916175591	0,169665769	34,8695887	9,46029E-36
	b	-0,73746994	0,037573475	-19,6274087	1,41874E-24
21	Konstanta (a)	4,81826994	0,134754983	35,75578296	4,43936E-33
	b	-0,61174873	0,029931614	-20,4382141	1,92048E-23
22	Konstanta (a)	4,85684659	0,153099279	31,72351049	1,82547E-29
	b	-0,66564815	0,037039414	-17,9713467	1,81455E-20
23	Konstanta (a)	2,517225729	0,188056677	13,38546322	1,03902E-07
	b	-0,38495383	0,04214745	-9,13350228	3,62422E-06
24	Konstanta (a)	2,644377365	0,283899946	9,314469409	2,23472E-07
	b	-0,35074098	0,056337367	-6,22572548	2,21569E-05
25	Konstanta (a)	4,904250453	0,099226771	49,42467047	1,61343E-41
	b	-0,65377548	0,023981389	-27,2617851	4,88369E-30
26	Konstanta (a)	5,383300363	0,140483752	38,31973659	7,72018E-41
	b	-0,67459436	0,034257052	-19,692131	2,60038E-26
27	Konstanta (a)	5,532150601	0,135503571	40,82660386	2,32026E-38
	b	-0,72735878	0,030373373	-23,9472507	5,56302E-28
28	Konstanta (a)	4,585275385	0,11534046	39,75426645	1,3527E-40
	b	-0,53941943	0,026053616	-20,704206	8,99382E-27
29	Konstanta (a)	5,269974205	0,183639866	28,69733202	2,65202E-28
	b	-0,68833903	0,042133835	-16,336966	2,6813E-19

**Lampiran 4. Hasil Output Pemodelan Regresi (Lanjutan)**

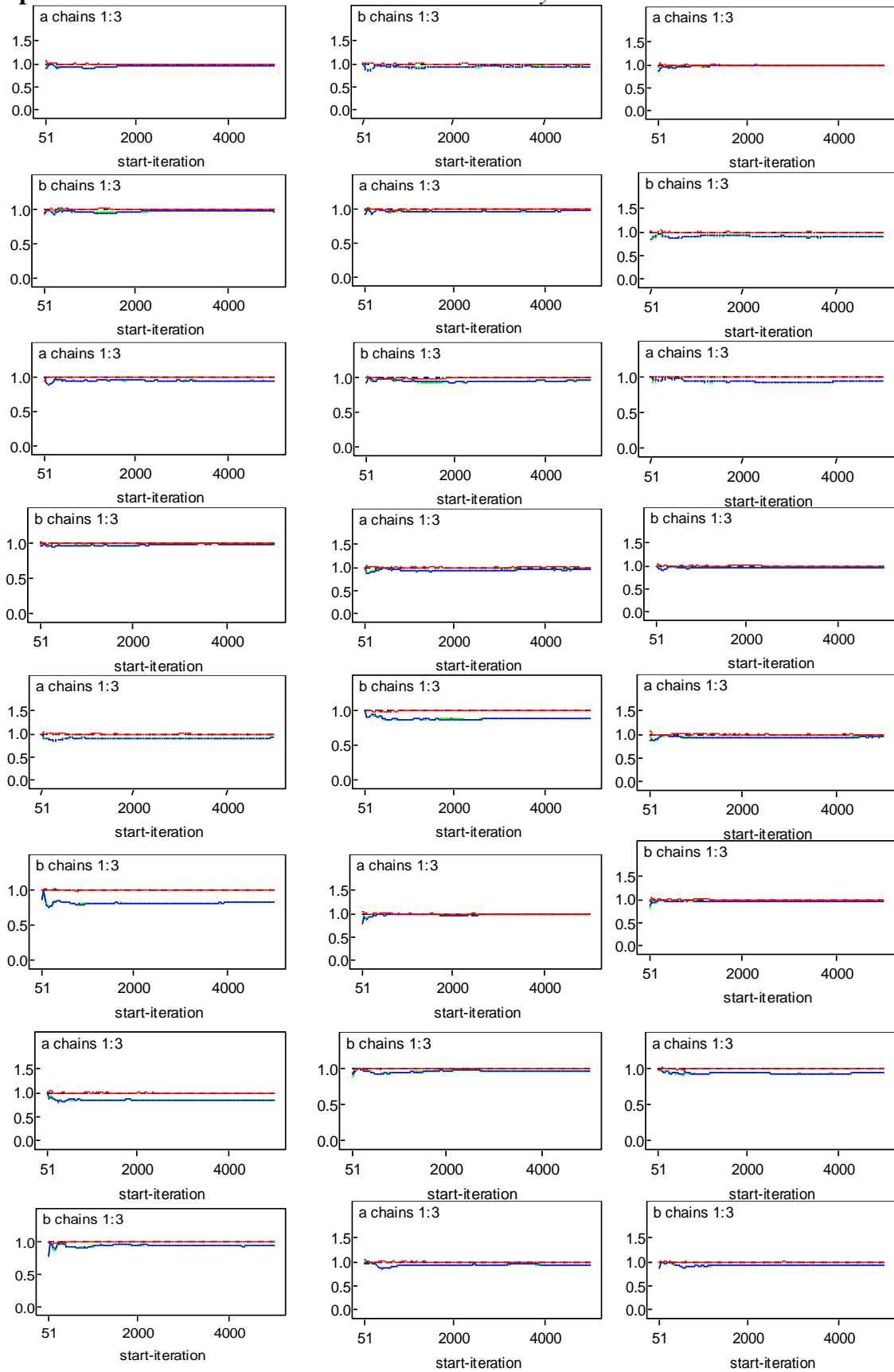
<b>Grid</b>	<b>Coefficients</b>	<b>Standard Error</b>	<b>t Stat</b>	<b>P-value</b>	<b>Grid</b>
30	Konstanta (a)	4,157553054	0,139358934	29,83341592	7,86596E-31
	b	-0,55703503	0,035880803	-15,5245973	1,8255E-19
32	Konstanta (a)	4,613882603	0,129178819	35,71702105	2,98979E-39
	b	-0,52757169	0,031349406	-16,8287619	3,90461E-23
33	Konstanta (a)	3,438171448	0,082361228	41,74502397	1,76318E-29
	b	-0,47729747	0,019291279	-24,7416191	1,97244E-22
34	Konstanta (a)	3,697872744	0,179271242	20,62725011	5,98458E-15
	b	-0,5237196	0,037234489	-14,0654435	7,83294E-12
35	Konstanta (a)	3,637522365	0,05106541	71,23260882	3,31621E-41
	b	-0,5437741	0,013936014	-39,0193422	1,15161E-31
36	Konstanta (a)	4,212121938	0,113180211	37,21606382	3,17201E-33
	b	-0,59644089	0,028734225	-20,7571593	2,29397E-23
37	Konstanta (a)	4,859530895	0,126977274	38,27087132	3,0965E-39
	b	-0,59398776	0,031499002	-18,8573519	1,21127E-24
38	Konstanta (a)	5,567206608	0,247938953	22,45394092	9,17692E-23
	b	-0,74558001	0,056393088	-13,2211239	2,20271E-15
39	Konstanta (a)	4,628943587	0,198343446	23,33802141	2,49302E-23
	b	-0,60040416	0,04756827	-12,6219464	8,76453E-15
40	Konstanta (a)	4,250220997	0,17968427	23,65382903	2,44424E-24
	b	-0,56892531	0,043491982	-13,081154	1,19913E-15
43	Konstanta (a)	5,454394891	0,150687766	36,1966671	1,67967E-36
	b	-0,71590808	0,035734096	-20,0343131	5,88519E-25
44	Konstanta (a)	4,858466401	0,114245721	42,52646265	2,22851E-37
	b	-0,6575151	0,027944246	-23,5295341	1,472E-26
45	Konstanta (a)	5,530826179	0,109214345	50,641939	2,78666E-45
	b	-0,71791924	0,025137124	-28,5601187	4,85647E-33
46	Konstanta (a)	4,741135946	0,114203868	41,51467044	4,20852E-42
	b	-0,58293984	0,027805324	-20,9650442	2,54273E-27
47	Konstanta (a)	5,497331747	0,185231826	29,67811664	1,2068E-31
	b	-0,67234488	0,038787398	-17,3341062	8,48874E-22
48	Konstanta (a)	6,266757735	0,266324416	23,53054155	1,92007E-20
	b	-0,86493563	0,055077061	-15,7040992	1,02282E-15
49	Konstanta (a)	-	-	-	-
	b	-	-	-	-
50	Konstanta (a)	5,823438134	0,861531927	6,759399105	0,002498419
	b	-1,13655403	0,183714022	-6,18653938	0,003469445
56	Konstanta (a)	5,111852115	0,163125168	31,33699215	9,29558E-31
	b	-0,69742362	0,039283948	-17,7533993	3,90043E-21

## Lampiran 5. Time Series dari History Chain Parameter Bayesian

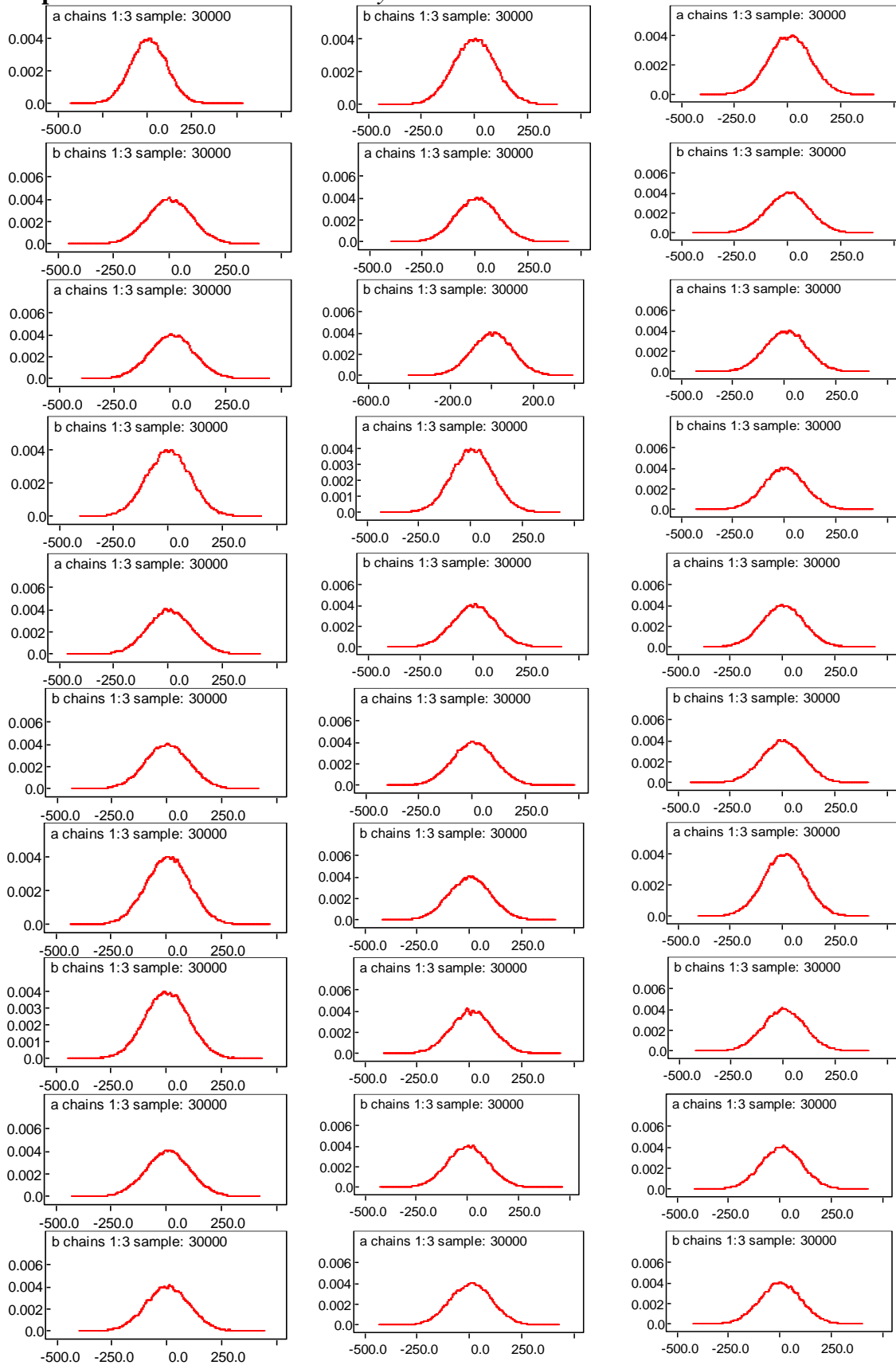




### Lampiran 6. Statistik *Gelman-Rubin* dari Parameter Bayesian



## Lampiran 7. Distribusi Parameter Bayesian



## Lampiran 8. *Syntax* Penentuan Maps Indonesia

```
library(readxl)
df <- read_excel("C:/Users/ASUS/Documents/kuliah/Tugas Akhir/New folder/Data
gempa.xlsx")
head(df)
kolom <- function(b) {
  if (b<=100) {
    ba=1
  }else if(b<=105){
    ba=2
  }else if(b<=110){
    ba=3
  }else if(b<=115){
    ba=4
  }else if(b<=120){
    ba=5
  }else if(b<=125){
    ba=6
  }else if(b<=130){
    ba=7
  }else if(b<=135){
    ba=8
  }else if(b<=140){
    ba=9
  }else{
    ba=10
  }
  return(ba)
}
baris <- function(k) {
  if (k>=3) {
    ba=1
  }else if(k>=0){
    ba=2
  }else if(k>=-3){
    ba=3
  }else if(k>=-6){
    ba=4
  }else if(k>=-9){
    ba=5
  }else{
    ba=6
  }
}
kol <- rep(0,length(df$Date))
bar <- rep(0,length(df$Date))
for (i in 1:length(df$Date)) {
  kol[i] <- kolom(df$`Indeks Lokasi Lon`[i])
}
for (i in 1:length(df$Date)) {
  bar[i] <- baris(df$`Index Lokasi Lat`[i])
}
df$kolom <- kol#data.frame(kol)
df$baris <- bar#data.frame(bar)
```

## Lampiran 8. Syntax Penentuan Maps Indonesia (Lanjutan)

```
lokasi <- rep(0,length(df$Date))

for (i in 1:length(df$Date)) {
  lokasi[i] <- (df$baris[i]-1)*10+df$kolom[i]
}

df$lokasi <- lokasi#data.frame(lokasi)
sebaran.lokasi <- as.factor(df$lokasi)
summary(sebaran.lokasi)

mt0 <- rep(0,60)
regi0 <- rep("i",60)
longi0 <- rep(0,60)
lati0 <- rep(0,60)
mt0 <- rep(0,60)

for (i in 1:60) {
  if (i==10 | i==20) {

  }else{
    mt0[i] <- as.numeric(max(df[df$lokasi==i,5]$MT))
    regi0[i] <- df[df$MT==max(df[df$lokasi==i,5]$MT) & df$lokasi==i,6]$Region
    longi0[i] <- as.numeric(max(df[df$lokasi==i,8]$`Indeks Lokasi Lon`))
    lati0[i] <- as.numeric(max(df[df$lokasi==i,7]$`Index Lokasi Lat`))
    mt0[i] <- as.numeric(max(df[df$lokasi==i,5]$MT))
  }
}

mt <- mt0[c(-10,-20)]
regi <- regi0[c(-10,-20)]
longi <- longi0[c(-10,-20)]
lati <- lati0[c(-10,-20)]
xx <- c(95.7,100.7,105.7,110.7,115.7,120.7,125.7,130.7,135.7,
  95.7,100.7,105.7,110.7,115.7,120.7,125.7,130.7,135.7,
  95.7,100.7,105.7,110.7,115.7,120.7,125.7,130.7,135.7,140.7,
  95.7,100.7,105.7,110.7,115.7,120.7,125.7,130.7,135.7,140.7,
  95.7,100.7,105.7,110.7,115.7,120.7,125.7,130.7,135.7,140.7,
  95.7,100.7,105.7,110.7,115.7,120.7,125.7,130.7,135.7,140.7)
yy <- c(5.3,5.3,5.3,5.3,5.3,5.3,5.3,5.3,5.3,5.3,
  2.3,2.3,2.3,2.3,2.3,2.3,2.3,2.3,2.3,2.3,
  -.7,-.7,-.7,-.7,-.7,-.7,-.7,-.7,-.7,-.7,
  -3.7,-3.7,-3.7,-3.7,-3.7,-3.7,-3.7,-3.7,-3.7,-3.7,
  -6.7,-6.7,-6.7,-6.7,-6.7,-6.7,-6.7,-6.7,-6.7,-6.7,
  -9.7,-9.7,-9.7,-9.7,-9.7,-9.7,-9.7,-9.7,-9.7,-9.7)
hh <- c(1,2,3,4,5,6,7,8,9,
  11,12,13,14,15,16,17,18,19,
  21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,
  31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,
  41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,
  51,52,53,54,55,56,57,58,59,60)
hh <- as.character(hh)
lab <- rep("i",58)
```

## Lampiran 8. Syntax Penentuan Maps Indonesia (Lanjutan 2)

```
for (i in 1:58) {
  lab[i] <- paste(regi[i],"\n","MT:",mt[i]," ; (",lati[i],"",longi[i],")",sep = "")
}
ft <- data.frame(xx,yy,hh,mt,regi,lati,longi,lab)
ft
library("ggplot2")
theme_set(theme_bw())

library("sf")
sf::sf_use_s2(FALSE)

library("rnatuarearth")
library("rnatuarearthdata")
library(colorspace)
library(ggmap)
world <- ne_countries(scale = "medium", returnclass = "sf")
class(world)
Indonesia <- ne_states(country = "Indonesia", returnclass = "sf")

base_color <- "#0000FF"
color_points <- c(
  lighten(base_color, 0.2),
  base_color,
  darken(base_color, 0.8)
)
color_palette <- colorRampPalette(color_points)
colors_map <- color_palette(10)
colors_map
Indonesia$indxx <- c(1:33)
p <- ggplot(data = world) +
  geom_sf() +
  geom_sf(data = Indonesia, aes(fill = name))+
  coord_sf(xlim = c(95, 145), ylim = c(10, -14), expand = FALSE) +
  xlab("Longitude") +
  ylab("Latitude") +
  ggtitle("Map of Earthquakes") +
  scale_x_continuous(breaks = seq(100, 140, by = 5)) +
  scale_y_continuous(breaks = c(-12,-9,-6,-3,0,3,6)) +
  theme(panel.grid.major = element_line(color = 2, linetype = 1, size = 0.5),
        panel.background = element_rect(color = NA, fill = NA),
        panel.ontop = TRUE)#+

p <- p+geom_label(data = ft, aes(xx, yy, label = hh))
p <- p+geom_label_repel(data = ft, aes(longi, lati, label = lab),max.overlaps = Inf,
  box.padding = .5,
  arrow = arrow(length = unit(2, "mm"), ends = "last", type = "closed"))
p
```

## Lampiran 9. *Syntax* Pemodelan dan Pemilihan Model Terbaik

```
library(rstanarm)
library(AICcmodavg)
idxs <- rep(0,nrow(df))
for (i in 1:nrow(df)) {
  idxs[i] <- (df$baris[i]-1)*10+df$kolom[i]
}
df <- data.frame(df,idxs)
head(df)
dat <- data.frame(df$Lat,df$Lon,as.numeric(df$MT),df$idxs)
colnames(dat) <- c("Lat","Lon","M","idxs")
GR <- function(idd,gg) {
  uM <- unique(dat[dat$idxs==idd,]$M)
  dattt <- dat[dat$idxs==idd,]

  N <- rep(0,length(uM))
  for (i in 1:length(uM)) {
    for (j in 1:nrow(dattt)) {
      if (dattt$M[j]>=uM[i]) {
        N[i] <- N[i]+1
      }
    }
  }

  if (gg==0) {
    mo <- lm(log(N,10)~uM)
    hsl <- c(
      if (mo$coefficients[2]<0) {
        paste(mo$coefficients[1],"-",abs(mo$coefficients[2])," M")
      }else{
        paste(mo$coefficients[1],"+",abs(mo$coefficients[2])," M")
      },
      mo$coefficients[1],
      mo$coefficients[2],
      AICc(mo)
    )
  }else{
    mb <- stan_glm(log(N,10)~uM,seed=0)
    waIC <- waic(mb)
    hsl <- c(
      if (mb$coefficients[2]<0) {
        paste(mb$coefficients[1],"-",abs(mb$coefficients[2])," M")
      }else{
        paste(mb$coefficients[1],"+",abs(mb$coefficients[2])," M")
      },
      mb$coefficients[1],
      mb$coefficients[2],
      as.numeric(waIC$waic)
    )
  }
}
```

### Lampiran 10. *Syntax* Pemodelan *Bayesian*

```
model;
{
for(i in 1:23){
y[i]~dnorm(mu[i],tau)
mu[i]<-a+b*x[i]
}

a~dnorm(3.72152467473392 ,1.0E-4)
b~dnorm(0.531257610761896, 1.0E-4)
tau~dgamma(1, 1.0E-4)
}

DATA

list(x= c( 3.6 , 4.5 , 3.8 , 5.5 , 4.7 , 4.6 , 4.4 , 4.9 , 4.1 , 4 , 4.2 , 3.4 , 3.5 , 3.1 , 4.8 , 3.7 ,
3.3 , 3.2 , 4.3 , 6 , 5.6 , 5.3 , 5.1 )
```

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BIODATA PENULIS



Penulis dengan nama lengkap Salsabilla Dinari, lahir di Surabaya, Jawa timur pada 29 Februari 2000. Penulis menempuh Pendidikan formal di SDN Ketabang 1 Surabaya, SMP Negeri 37 Surabaya, dan SMAN 19 Surabaya. Kemudian, penulis melanjutkan Pendidikan di Departemen Sains Aktuaria FSAD Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) tahun 2018 melalui jalur Mandiri dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 06311840000054. Selama perkuliahan, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Aktuaria (HIMASAKTA) ITS sebagai staf Dalam Negeri pada periode 2019/2020 serta aktif berpartisipasi dalam acara kepanitiaan yang diadakan berskala Institut maupun skala Departemen. Dalam perlombaan penulis berpartisipasi sebagai peserta dalam Business Case Competition yang diadakan Oleh ITS EXPO atau berskala Nasional. Penulis juga aktif dalam magang yaitu salah satunya di Bank Rakyat Indonesia (BRI). Apabila pembaca ingin memberi kritik dan saran, serta diskusi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir dengan penulis dapat menghubungi via email dengan alamat [salsabilladnr@gmail.com](mailto:salsabilladnr@gmail.com).