TUGAS AKHIR – KS184822

MODEL *INHOMOGENEOUS NEYMAN-SCOTT COX PROCESS* UNTUK PEMETAAN RISIKO GEMPABUMI DI SUMATERA

RAHMA METRIKASARI
NRP 062116 4000 0054

Dosen Pembimbing
Dr. Achmad Choiruddin, S.Si.,M.Sc.

PROGRAM STUDI SARJANA
DEPARTEMEN STATISTIKA
FAKULTAS SAINS DAN ANALITIKA DATA
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020

TUGAS AKHIR – KS184822

MODEL *INHOMOGENEOUS NEYMAN-SCOTT COX PROCESS* UNTUK PEMETAAN RISIKO GEMPABUMI DI SUMATERA

RAHMA METRIKASARI
NRP 062116 4000 0054

Dosen Pembimbing
Dr. Achmad Choiruddin, S.Si.,M.Sc.

PROGRAM STUDI SARJANA
DEPARTEMEN STATISTIKA
FAKULTAS SAINS DAN ANALITIKA DATA
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

FINAL PROJECT – KS184822

INHOMOGENEOUS NEYMAN-SCOTT COX PROCESS MODEL FOR EARTHQUAKE RISK MAPPING IN SUMATERA

RAHMA METRIKASARI
SN 062116 4000 0054

Supervisor
Dr. Achmad Choiruddin, S.Si.,M.Sc.

UNDERGRADUATE PROGRAMME
DEPARTMENT OF STATISTICS
FACULTY OF SCIENCE AND DATA ANALYTICS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

MODEL *INHOMOGENEOUS NEYMAN-SCOTT COX PROCESS* UNTUK PEMETAAN RISIKO GEMPABUMI DI SUMATERA

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Statistika
pada
Program Studi Departemen Statistika
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
Rahma Metrikasari
NRP. 062116 4000 0054

Disetujui oleh Pembimbing :
Dr. Achmad Choiruddin, S.Si., M.Sc. ( )
NIP. 1991201911101

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS SAINS DAN ANALITIKA DATA
DEPARTEMEN STATISTIKA

Mengetahui,
Kepala Departemen Statistika

Dr. Dra. Kartika Fithriasari, M.Si
NIP. 19691212 199303 2 002

SURABAYA, JUNI 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

MODEL *INHOMOGENEOUS NEYMAN-SCOTT COX PROCESS* UNTUK PEMETAAN RISIKO GEMPABUMI DI SUMATERA

Nama Mahasiswa : Rahma Metrikasari
NRP : 062116 4000 0054
Departemen : Statistika-FSAD-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Achmad Choiruddin, S.Si., M.Sc.

ABSTRAK

Kondisi geografis Indonesia yang berada pada jalur sirkum pasifik dan terletak diantara pertemuan tiga lempeng tektonik menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara dengan tingkat risiko gempa yang tinggi. Salah satu wilayah rawan gempa di Indonesia adalah pulau Sumatera. Pada penelitian ini, kejadian gempa di pulau Sumatera dimodelkan dengan inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process karena proses terjadinya gempabumi secara umum diawali dengan gempa utama dan diikuti oleh gempa susulan, sehingga persebaran titik gempa di pulau Sumatera cenderung mengelompok di wilayah tertentu. Selain itu, terdapat kecenderungan bahwa gempabumi terjadi di daerah yang dekat dengan gunung berapi, zona subduksi, dan sesar aktif. Hasil eksplorasi data menunjukkan bahwa data gempabumi di pulau Sumatera tidak homogen yang dimungkinkan karena faktor geologis di pulau Sumatera seperti keberadaan gunung berapi, zona subduksi, dan sesar aktif. Selain itu, analisis korelasi spasial menunjukkan bahwa pola persebaran gempabumi di Sumatera cenderung membentuk cluster. Pemodelan kejadian gempa dengan inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process menunjukkan faktor jarak subduksi dan sesar secara signifikan mempengaruhi risiko terjadinya gempa. Jika jarak suatu lokasi mendekat sejauh 100 km ke zona subduksi, maka risiko terjadinya gempa di sekitar lokasi tersebut meningkat sebesar 1.9 kali sedangkan jika jarak suatu lokasi ke sesar mendekat sejauh 100 km, maka risiko terjadinya gempa di sekitar lokasi tersebut meningkat sebesar 1.7 kali. Validasi model dengan plot envelope K-function menunjukkan bahwa inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process baik digunakan untuk memodelkan data gempa di pulau Sumatera selama periode 2009-2018 dengan magnitudo ≥ 4.

Kata kunci: Cluster, Cox Process, Gunung Berapi, Sesar, Subduksi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

INHOMOGENEOUS NEYMAN-SCOTT COX PROCESS MODEL FOR EARTHQUAKE RISK MAPPING IN SUMATERA

Name	**:**	**Rahma Metrikasari**
Student Number	**:**	**062116 4000 0054**
Department	**:**	**Statistics**
Supervisor	**:**	**Dr. Achmad Choiruddin, S.Si., M.Sc.**

ABSTRACT

The geographical condition of Indonesia, which is on the Pacific Circum lane and located between three tectonic plates, makes Indonesia one of the countries with a high level of earthquake risk. One of the earthquake prone areas in Indonesia is the island of Sumatra. In this study, the earthquake event on the island of Sumatra was modeled with inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process because the process of earthquake occurrence was generally preceded by a major earthquake and followed by aftershocks, so the distribution of earthquake points on the island of Sumatra tends to cluster in certain areas. In addition, there is a tendency that earthquakes occur in areas close to volcanoes, subduction zones, and active faults. The results of data exploration indicate that earthquake data on the island of Sumatra is not homogeneous which is possible due to geological factors on the island of Sumatra such as the presence of volcanoes, subduction zones, and active faults. In addition, spatial correlation analysis shows that the pattern of earthquake distribution in Sumatera tends to form clusters. Modeling earthquake events with inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process shows the subduction distance and fault factors significantly influence the risk of earthquake occurrence. If the distance of a location approaches 100 km to the subduction zone, the risk of an earthquake around that location increases by 1.9 times whereas if the distance of a location to the fault approaches 100 km, the risk of an earthquake around that location increases by 1.7 times. Model validation with K-function envelope plot shows that inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process is good to be used to model earthquake data on the island of Sumatra during the period 2009-2018 with a magnitude of ≥ 4.

Keywords: Cluster, Cox Process, Fault, Subduction, Volcano.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas rahmat dan hidayah yang diberikan Allah SWT sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul "**Model *Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* untuk Pemetaan Risiko Gempabumi di Sumatera**" dengan lancar.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini dapat terselesaikan tidak terlepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua, Bapak Rachmad Prihandoko dan Ibu Elfi Purnamasari, dan keluarga tercinta yang sudah mendoakan tiada henti dan memberi dukungan baik secara moril maupun materiil kepada penulis.
2. Dr. Dra. Kartika Fithriasari, M.Si. selaku Kepala Departemen Statistika yang telah memberikan fasilitas, sarana, dan prasarana sehingga membantu kelancaran penyelesaian Tugas Akhir.
3. Prof. Drs. Nur Iriawan, MIKom., Ph.D. selaku dosen wali selama masa studi yang telah banyak memberikan saran, arahan, dan sema-ngat dalam menjalani perkuliahan.
4. Dr. Achmad Choiruddin, S.Si., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu dan dengan sabar memberi bimbingan, saran, dan motivasi selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir.
5. Dr. Drs. Agus Suharsono, M.S. dan Bu Wibawati, S.Si., MSi selaku dosen penguji yang telah memberikan koreksi dan masukan dengan sangat sabar untuk perbaikan Tugas Akhir ini.
6. Seluruh dosen Statistika ITS yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan yang sangat berharga, serta segenap karyawan Departemen Statistika ITS.

7. Diego Yoga Haryono yang selalu memberikan semangat dan selalu bersedia mendengarkan keluh kesah penulis tentang perkuliahan maupun curhatan pribadi.
8. Teman-teman Statistika ITS angkatan 2016, “TR16GER”, yang selalu membantu menyelesaikan persoalan akademis dan menemani dan memberikan semangat kepada penulis selama melewati masa perkuliahan.
9. Partner dan teman-teman bimbingan Finola Trsinisa, Khalimatus Sakdiyah, dan Rifda Zukhrufi Almas yang sudah menemani, membantu, dan saling memberikan semangat hingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir bersama-sama.
10. Aisyah yang selalu membantu saat penulis mengalami kesulitan dalam mengerjakan Tugas Akhir.

Besar harapan penulis untuk mendapatkan kritik dan saran yang membangun sehingga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak yang terkait.

Surabaya, Juni 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i

LEMBAR PENGESAHAN v

KATA PENGANTAR xi

DAFTAR ISI xiii

DAFTAR GAMBAR xv

DAFTAR TABEL xvii

DAFTAR LAMPIRAN xix

BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 4
1.3 Tujuan Penelitian 5
1.4 Manfaat Penelitian 5
1.5 Batasan Masalah 5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 7
2.1 *Spatial Point Process* 7
2.1.1 *Poisson Process* 7
2.1.2 *Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* 8
2.2 *Properties of Spatial Point Process* 9
2.2.1 *First Order Properties* 9
2.2.2 *Second Order Properties* 9
2.3 Eksplorasi Data 10
2.3.1 *Chi-Squared Test* 10
2.3.2 *Ripley K-Function* 11
2.4 Estimasi Parameter 13
2.4.1 *Berman Turner* 13
2.4.2 *Second-Order Composite Likelihood* 14
2.5 Kebaikan Model 15
2.6 Tinjauan Non Statistik 15

2.6.1 Gempabumi 16
2.6.2 Gunung Berapi.....17
2.6.3 Sesar 17
2.6.4 Subduksi 17

BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....19
3.1 Sumber Data 19
3.2 Variabel Penelitian.....19
3.3 Langkah Analisis 21
3.4 Diagram Alir Langkah-langkah Analisis 23

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....25
4.1 Karakteristik Gempabumi Berdasarkan Faktor Geologi Sesar, Subduksi, dan Gunung Berapi.....25
4.2 Uji *Chi-Squared*.....28
4.3 Analisis Korelasi Spasial 28
4.4 Pemodelan data gempabumi di pulau Sumatera menggunakan model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* 29
4.5 Peta Prediksi Risiko Gempa di Pulau Sumatera 31
4.6 Pengecekan Kebaikan Model.....32

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....35
5.1 Kesimpulan.....35
5.2 Saran dan Rekomendasi.....36

DAFTAR PUSTAKA 37

LAMPIRAN 39

BIODATA PENULIS 51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Zona Subduksi dan Sesar Sumatera.....1
Gambar 2.1 Pola Persebaran *Point Pattern* Regular (Kiri), Independen (Tengah), dan *Cluster* (Kanan) 7
Gambar 2.2 Ilustrasi *Quadrat Count* : Contoh *Data Swedishpines*.....11
Gambar 2.3 Visualisasi *K-function* untuk Regular (Kiri), *Independen* (Tengah), dan *Cluster* (Kanan) 13
Gambar 2.4 Visualisasi *Envelope K-function* : Contoh *Data Swedishpines*.....15
Gambar 3.1 *Pixel Image* (a) : Jarak Titik Gempa ke Gunung Berapi dalam derajat, (b) : Jarak Titik Gempa ke Zona Subduksi dalam derajat , (c) : Jarak Titik Gempa ke Sesar dalam derajat.....20
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian 23
Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian (Lanjutan) 24
Gambar 4.1 Persebaran Gempa Besar di Pulau Sumatera Tahun 2009-2018 Magnitudo ≥ 4 25
Gambar 4.2 Jarak Titik Gempa Terhadap (a) Gunung Berapi, (b) Sesar, (c) Zona Subduksi (dalam 100km) 27
Gambar 4.3 *Quadrat Count* Data Gempa di Pulau Sumatera 28
Gambar 4.4 *Plot inhomogeneous K-Function* Data Gempa ..29
Gambar 4.5 Plot Hasil Prediksi *Intensity* Gempa di Pulau Sumatera 31
Gambar 4.6 *Plot Envelope K-Function Model Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process*.....32

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Variabel Penelitian 19
Tabel 3.2 Struktur Data Jarak Gempabumi Terhadap Variabel 19
Tabel 4.1 Nilai Estimasi dari $\hat{\kappa}$, $\hat{\boldsymbol{\beta}}$, dan $\hat{\omega}$ 30

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Gempa di Indonesia Tahun 2008-2019 39
Lampiran 2. Data Gunung Berapi di Indonesia..... 40
Lampiran 3. Data Zona Subduksi..... 41
Lampiran 4. Data Sesar 42
Lampiran 5. *Syntax* R *Pre-Processing* Data..... 43
Lampiran 6. *Syntax* R Visualisasi Data 44
Lampiran 7. *Syntax* R Eksplorasi Data..... 45
Lampiran 8. *Syntax* R Pemodelan 45
Lampiran 9. *Output* R Uji Stasioneritas 47
Lampiran 10. *Output* R Model Lengkap 47
Lampiran 11. *Output* R Model Tanpa Gunung Berapi..... 48
Lampiran 12. Daftar Notasi..... 49
Lampiran 13 Surat Pernyataan Data 50

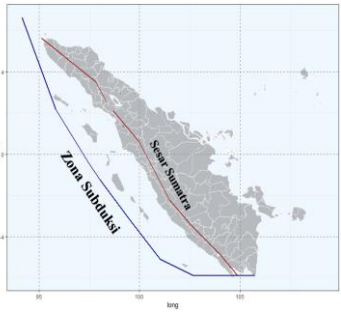
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat risiko gempa yang tinggi (Ihsan, 2008) karena terletak diantara tiga lempeng tektonik yaitu lempeng Eurasia, lempeng IndoAustralia dan lempeng Samudra Pasifik. Selain itu, posisi Indonesia juga berada di jalur sirkum pasifik atau yang dikenal dengan *Pacific Ring of Fire*, dimana 80% dari gempabumi di dunia terjadi di wilayah tersebut. Selama bulan Agustus 2019, BMKG melaporkan telah terjadi 673 kejadian gempabumi, dimana gempabumi dengan mangnitudo signifikan diatas 5 terjadi sebanyak 22 kali. 25 wilayah rawan gempabumi di Indonesia karena pertumbukan ketiga lempeng tersebut yaitu Aceh, Sumatera Utara (Simeulue), Sumatera Barat, Jambi, Bengkulu, Lampung, Banten Pandeglang, Jawa Barat, Bantar Kawung, Yogyakarta, Lasem, Jawa Timur, Bali, NTB, NTT, Kepulauan Aru, Sulawesi Selatan, Sulawesi Tenggara, Sulawesi Tengah, Sulawesi Utara, Sangir Talaud, Maluku Utara, Maluku Selatan, Kepala Burung Papua Utara, Jayapura, Nabire, Wamena, dan Kalimantan Timur (ESDM, 2013).

Pulau Sumatera merupakan salah satu wilayah tektonik aktif di dunia karena sepanjang wilayah Sumatera dilewati sesar aktif sekaligus berdekatan dengan subduksi yang dijelaskan pada Gambar 1.1.



Gambar 1. 1 Zona Subduksi dan Sesar Sumatera

Selain itu, sejarah mencatat gempa dengan skala besar sering terjadi di Sumatera diantaranya yaitu gempa yang terjadi di Kepulauan Mentawai pada tanggal 25 Oktober 2010 dengan kekuatan 7,7 M, gempa yang terjadi di Nias pada tanggal 28 Maret 2005 dengan kekuatan 8,6 M, dan gempa yang terjadi di Aceh pada tanggal 26 Desember 2004 dengan kekuatan 9,1 M. Bahkan gempa yang terjadi di Aceh pada tahun 2004 juga memicu terjadinya gempa di beberapa negara tetangga yaitu Thailand, Sri Lanka, dan India yang memakan korban jiwa sebanyak 250.000 orang. Dengan demikian, Pulau Sumatera penting dijadikan sebagai prioritas dalam penelitian bencana gempa untuk mengurangi kerugian yang ditimbulkan akibat gempabumi.

Salah satu upaya pemerintah untuk meminimalkan dampak dan kerugian yang disebabkan oleh gempabumi, yaitu dengan melakukan pemetaan menggunakan metode *Probabilistic Seismic Hazard Map* (PSHA Map). PSHA adalah metode analisis bahaya gempa probabilistik dengan memperhitungkan dan menggabungkan ketidakpastian dari magnitudo, lokasi, dan waktu kejadian gempa. Dasar utama penyusunan PSHA Map adalah kejadian gempa dimodelkan sebagai fenomena proses Poisson yang tidak bergantung pada waktu (PUPR, 2017). Namun, metode yang digunakan dalam penyusunan peta tersebut masih kurang optimal karena metode yang digunakan mengasumsikan bahwa gempa berasal dari proses Poisson, artinya kejadian gempabumi di suatu lokasi independen terhadap gempabumi di lokasi yang lain. Padahal terjadinya gempabumi susulan (*aftershocks*) sangat erat keterkaitannya dengan gempabumi utama. Selain itu, penyusunan peta gempa hanya didasarkan pada informasi yang meliputi kejadian gempa seperti lokasi, waktu, magnitudo, kedalaman, dan kerusakan sehingga eksplorasi data yang dilakukan masih kurang.

Penelitian tentang gempabumi sebelumnya pernah dilakukan oleh Bray dan Schoenberg (2013), untuk memprediksi terjadinya gempabumi di California menggunakan metode *Epidemic-Type Aftershock Sequence* (ETAS). ETAS adalah sebuah model *point process* dengan nilai *intensity* yang kondisional yaitu

$\rho(s,t)$, yang merepresentasikan ekspektasi banyaknya *event* yang terjadi pada waktu ke *t* dan lokasi *s*. Hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut yaitu sebagian besar gempabumi diprediksi akan terjadi di selatan Laut Salton, dekat perbatasan antara California dan Meksiko. Penelitian mengenai gempabumi juga pernah dilakukan oleh Siino dkk (2017), menggunakan model hybrid dengan memperhatikan informasi geografi yaitu jarak lokasi terjadinya gempabumi ke patahan, gunung berapi, dan batas lempeng terdekat. Hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut yaitu jarak lokasi terjadinya gempabumi ke patahan dan batas lempeng terdekat berpengaruh signifikan terhadap *intensity* terjadinya gempabumi, artinya jika suatu lokasi jaraknya dekat dengan patahan dan batas lempeng, maka banyaknya gempabumi yang terjadi di wilayah tersebut lebih tinggi dibandingkan wilayah lain. Selain itu, penelitian tentang pemodelan *intensity* gempabumi dengan mempertimbangkan jarak lokasi terjadinya gempabumi ke patahan, batas lempeng , dan gunung berapi terdekat juga pernah dilakukan oleh Sakdiyah dan Choiruddin (2020) menggunakan model *log Gaussian Cox Process* dan diperoleh kesimpulan bahwa jarak lokasi ke patahan dan batas lempeng terdekat berpengaruh signifikan terhadap *intensity* gempabumi.

Penelitian selanjutnya mengenai gempabumi juga pernah dilakukan oleh Anwar dkk (2012), menggunakan *Strauss point process model* dengan memperhatikan informasi geografi yaitu jarak lokasi terjadinya gempabumi ke patahan dan batas lempeng terdekat. Hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut yaitu, jarak lokasi terjadinya gempabumi ke patahan dan batas lempeng terdekat berpengaruh signifikan terhadap *intensity* terjadinya gempabumi, dimana sebagian besar gempabumi terjadi batas kedua lempeng.

Penelitian tentang gempabumi menggunakan model *Neyman-Scott* pernah dilakukan oleh Jones (1969) menggunakan data gempabumi di New Zealand. Kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian tersebut yaitu, model *Neyman-Scott* cukup baik memodelkan data gempabumi dangkal (0-60 km) di New Zealand.

Selain itu, penelitian lain tentang gempabumi menggunakan model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* pernah dilakukan oleh Trisnisa dkk (2019), dimana kesimpulan yang diperoleh yaitu *intensity* gempabumi diprediksi tinggi di wilayah Jawa Timur. Oleh karena itu, pada penelitian ini, kejadian gempa yang terjadi di Pulau Sumatera akan dimodelkan menggunakan metode statistika spasial yaitu model *Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process*. Selain itu, pemodelan juga melibatkan faktor yang diduga berpengaruh signifikan terhadap risiko kejadian gempabumi di Sumatera, yaitu jarak lokasi gempabumi ke sesar aktif, zona subduksi, dan gunung berapi. Model *Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* dipilih karena model tersebut mampu mengakomodasi dependensi antar lokasi gempabumi dan bisa digunakan untuk memodelkan pola persebaran data yang membentuk *cluster*. Hasil akhir dari penelitian ini yaitu berupa peta kerawanan gempa di Pulau Sumatera, dimana probabilitas terjadinya gempa dihitung menggunakan persamaan model *Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process*. Pembuatan peta ini diharapkan dapat digunakan sebagai salah satu upaya mitigasi bencana gempabumi di Pulau Sumatera.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah berdasarkan latar belakang diatas yaitu sebagai berikut .

1. Bagaimana karakteristik persebaran gempabumi yang terjadi di pulau Sumatera berdasarkan faktor-faktor yang diduga mempengaruhi yaitu lokasi gunung berapi, sesar aktif, dan zona subduksi?
2. Bagaimana pemodelan risiko gempabumi yang terjadi di pulau Sumatera terhadap faktor-faktor yang diduga mempengaruhi yaitu jarak gempabumi dengan lokasi gunung berapi, sesar aktif, dan zona subduksi?
3. Bagaimana pemetaan hasil prediksi gempabumi di pulau Sumatera?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah pada poin diatas, maka tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut .

1. Mengetahui karakteristik persebaran gempabumi yang terjadi di pulau Sumatera berdasarkan faktor-faktor yang diduga mempengaruhi yaitu lokasi gunung berapi, sesar aktif, dan zona subduksi.
2. Mengetahui pemodelan risiko gempabumi yang terjadi di pulau Sumatera terhadap faktor-faktor yang diduga mempengaruhi yaitu jarak gempabumi dengan lokasi gunung berapi, sesar aktif, dan zona subduksi.
3. Mengetahui pemetaan hasil prediksi gempabumi di pulau Sumatera.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang ingin dicapai dalam pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut .

1. Bagi pemerintah dalam hal ini BMKG, hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai upaya mitigasi gempabumi di pulau Sumatera guna mengurangi dampak akibat gempabumi.
2. Bagi perkembangan ilmu pengetahuan dalam hal ini penelitian selanjutnya, hasil penelitian ini dapat digunakan untuk menambah wawasan dan sebagai dasar untuk penelitian selanjutnya.

1.5 Batasan Masalah

Berikut adalah batasan masalah pada penelitian ini.

1. Rentang waktu data gempa yang digunakan tahun 2009-2018.
2. Penelitian ini fokus pada gempa besar yang terjadi di pulau Sumatera dengan magnitudo lebih besar sama dengan 4.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

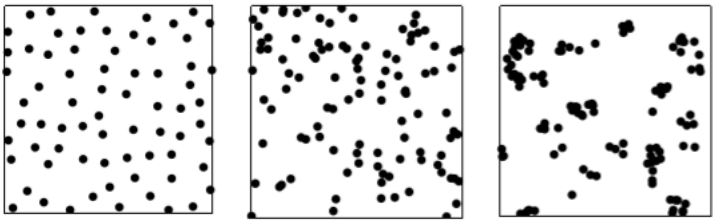
Bagian ini akan membahas kajian pustaka yang berkaitan dengan model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process*.

2.1 *Spatial Point Process*

Spatial Point Process $\mathbf{X}$ adalah suatu mekanisme random dimana *output* dari mekanisme tersebut berupa *spatial point pattern*. *Spatial point pattern* $\mathbf{X}$ adalah himpunan hasil observasi di *observation window* B, B ⊂ S yang secara matematis dituliskan dalam persamaan 2.1.

$$\mathbf{x} = \{x_u, u \in B\}, B \subset S \qquad 2.1$$

Spatial point pattern memiliki tiga jenis pola persebaran yaitu reguler, independen, dan *cluster*. Gambar 2.1 menunjukkan visualisai pola persebaran *point pattern* (Baddeley dkk., 2015).



Gambar 2. 1 Pola Persebaran *Point Pattern* Regular (Kiri), Independen (Tengah), dan *Cluster* (Kanan)

Gambar 2.1 menunjukkan bahwa pada pola reguler data *point* cenderung saling menjauh satu sama lain, pada pola independen data *point* menyebar secara random dan tidak membentuk pola tertentu, sedangkan pada pola *cluster* data *point* cenderung saling berdekatan satu dan lainnya.

2.1.1 *Poisson Process*

Poisson Process $\mathbf{X}$ yang dibatasi dalam wilayah B, $B \subseteq S$, memiliki sifat-sifat sebagai berikut :

(i) Banyaknya titik di B atau N(B) berdistribusi Poisson dengan *mean* $\mu(B)$

(ii) Jika wilayah B_1, B_2, … saling bebas satu dan lainnya, maka banyak titik di masing-masing wilayah saling independen (Baddeley dkk., 2015).

2.1.2 *Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process*

Cox process adalah *Poisson Process* yang memiliki *intensity* random (Baddeley dkk., 2015). Jika $Z = \{Z(u) : u \in S\}$ adalah *nonnegative random field* dan **X|Z** adalah *Poisson Process* dengan *intensity* Z, maka X adalah *Cox Process* dengan *intensity* $\rho(u)$, dimana $\rho(u) = E(Z(u))$ (Møller dan Waagepetersen, 2004).

Salah satu bentuk dari *Cox Process* yaitu *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process*. Misalkan **C** adalah gempa utama dibangkitkan dari proses *Poisson* yang stasioner dengan *intensity* $\kappa > 0$, maka gempa susulan dengan notasi $X_{c,c\in C}$ merupakan proses *Poisson* independen dengan fungsi intensitas

$$\rho_c(u;\boldsymbol{\beta}) = \exp(\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{x}(u)) k(u-c;\omega), \qquad 2.2$$

dengan k adalah fungsi kepadatan peluang distribusi jarak antara *offspring* dan *mother* proses dengan parameter ω (Choiruddin dkk., 2018). Maka, $X = \bigcup_{c\in C} X_c$ adalah *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* dengan fungsi intensitas

$$\rho(u;\boldsymbol{\beta}) = \kappa \exp(\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{x}(u)). \qquad 2.3$$

Salah satu bentuk spesifik *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* yaitu *Thomas Cluster Process*. Pada *Thomas Cluster Process*, fungsi kepadatan peluang jarak antara gempa utama dan gempa susulan saling independen dan berdistribusi normal (Baddeley dkk., 2015). Fungsi *k* pada *Thomas Cluster Process* dapat dilihat pada persamaan 2.4 (Møller dan Waagepetersen, 2007).

$$k(u) = \exp(-\|u\|^2 / (2\omega^2)) / (2\pi\omega^2). \qquad 2.4$$

Sedangkan, rumus *pair correlation function* nya ditulis pada persamaan 2.5.

$$g(u) = 1 + (4\pi\omega^2)^{-1} \exp(-\|u\|^2 / (4\omega^2)) / \kappa \,. \qquad 2.5$$

Jika nilai ω semakin kecil, maka jarak antara gempa susulan ke gempa utama semakin pendek, sehingga *cluster* yang terbentuk cenderung rapat dan jika nilai κ semakin kecil, maka jumlah gempa utama yang terjadi juga semakin sedikit.

2.2 *Properties of Spatial Point Process*

Properties yang digunakan pada penelitian ini yaitu *first order* yaitu *mean* dan *second order* yaitu korelasi.

2.2.1 *First Order Properties*

First Order dari sebuah *point process* analog dengan ekspektasi jumlah *point* yang diamati pada *observation window* B, $\mathrm{B} \subseteq \mathbb{R}^2$ secara ringkas ditulis pada persamaan 2.6 (Møller dan Waagepetersen, 2007).

$$\mu(B) = E(N(B)), \ \mathrm{B} \subseteq \mathbb{R}^2 \,. \qquad 2.6$$

First order dapat dimodelkan oleh fungsi *intensity* $\rho(u;\beta)$ yang merupakan fungsi non negatif dimana

$$\mu(B) = \int_B \rho(u;\boldsymbol{\beta}) \, \mathrm{d}u \,, \qquad 2.7$$

dengan $\rho(u;\boldsymbol{\beta})$ adalah peluang mengobservasi sebuah *point* di area yang sangat kecil dengan luas *du* dan pusat *u*.

2.2.2 *Second Order Properties*

Second Order dari sebuah *point process* di suatu lokasi C, dimana $C \subseteq \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2$ adalah $\mu^{(2)}$ seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.8.

$$\mu^{(2)}(C) = \iint \mathrm{I}\left[(u,v) \in C\right] \rho^{(2)}(u,v,\boldsymbol{\theta}) \, \mathrm{d}u \, \mathrm{d}v \,, \qquad 2.8$$

dengan $\rho^{(2)}(u,v,\boldsymbol{\theta}) \, \mathrm{d}u \, \mathrm{d}v$ adalah peluang mengobservasi sepasang titik di dua wilayah yang sangat kecil dengan pusat *u* dan *v* dan volume $\mathrm{d}u \, \mathrm{d}v$, dan I adalah fungsi indikator yang bernilai 1 jika *u*

dan *v* adalah elemen dari *C* dan akan bernilai 0 jika *u* dan *v* bukan elemen dari *C* (Møller dan Waagepetersen, 2004).

Salah satu cara yang bisa digunakan untuk mengetahui pola persebaran dari *point process* yaitu dengan mempertimbangkan *pair correlation function*. *Pair correlation function* merupakan hasil pembagian *second order moment* dengan perkalian *intensity* di masing-masing wilayah *u* dan *v* yaitu $\rho(u,\beta)\rho(v,\beta)$ yang secara matematis ditunjukkan pada persamaan 2.9.

$$g(u,v,\boldsymbol{\theta}) = \frac{\rho^{(2)}(u,v,\boldsymbol{\theta})}{\rho(u,\beta)\rho(v,\beta)}. \qquad 2.9$$

Jika nilai $g(u,v,\boldsymbol{\theta}) < 1$, maka jarak antar *point pattern* saling berjauhan, tetapi jika nilai $g(u,v,\boldsymbol{\theta}) > 1$ maka jarak antar *point pattern* saling berdekatan dan cenderung membentuk *cluster*, sedangkan jika nilai $g(u,v,\boldsymbol{\theta}) = 1$, maka antar *point pattern* saling independen satu sama lain (Møller dan Waagepetersen, 2007).

2.3 Eksplorasi Data

Pada penelitian ini, eksplorasi data dilakukan dengan menguji stasioneritas data dan mengetahui pola persebaran data dengan melakukan analisis korelasi spasial.

2.3.1 *Chi-Squared Test*

Chi-Squared Test dilakukan untuk menguji apakah data pengamatan yang digunakan dalam penelitian mengikuti pola yang stasioner atau tidak. Hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini yaitu :

H_0 : Data mengikuti pola yang stasioner

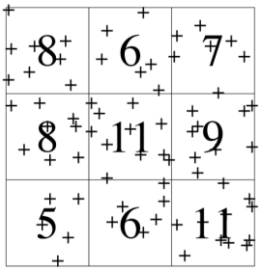
H_1 : Data mengikuti pola yang tidak stasioner

Statistik uji yang digunakan yaitu χ^2_{hit} yang diperoleh menggunakan rumus pada persamaan 2.10.

$$\chi^2_{hit} = \sum_j \frac{(n_j - o)^2}{o}. \qquad 2.10$$

Keterangan:
n_j = banyaknya *point* di *quadrat count* ke- *j*
o = ekspektasi banyaknya *point* di *quadrat count*

Karena data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data *point*, maka untuk menentukan nilai n_j sebelumnya *observation window* dibagi menjadi beberapa bagian yang sama besar, sehingga didalam *observation window* terdapat beberapa bagian yang lebih kecil dimana antara bagian satu dengan yang lainnya saling bebas yang disebut *quadrat count* dan banyaknya data *point* di tiap *quadrat count* saling independen, sehingga n_j di tiap *quadrat count* didapatkan dengan menghitung banyaknya titik yang berada di *quadrat count* tersebut, sedangkan nilai *o* didapatkan dari jumlah keseluruan poin di *obseravtin window* dibagi dengan banyaknya *quadrat count*. Contoh visualisasi dari *quadrat count* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Ilustrasi *Quadrat Count* : Contoh *Data Swedishpines*

Hasil pengujian akan memberikan keputusan tolak H_0 jika nilai $\chi^2_{hit} > \chi^2_{\alpha,df}$ atau *P-value* yang diperoleh dari hasil pengujian kurang dari α (Baddeley dkk., 2015).

2.3.2 *Ripley K-Function*

K-function adalah salah satu metode yang digunakan untuk menganalisis pola persebaran data *spatial point patterns*. Konsep menghitung nilai *K-function* yaitu dengan menghitung jarak antar semua pasangan titik berbeda (d_{ij}).Rumus untuk menghitung *K-function* dapat dilihat pada persamaan 2.11.

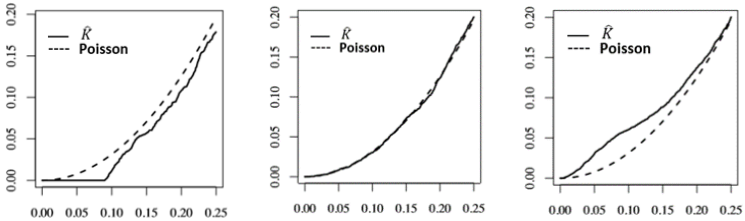
$$\hat{K}(r) = \frac{|B|}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \mathbf{I}\left\{d_{ij} \leq r\right\} e_{ij}(r), \qquad 2.11$$

dengan I akan bernilai 1 jika d_{ij} berada pada selang r dan 0 jika d_{ij} berada diluar selang r. Jika data *point* membentuk pola yang mengelompok, maka nilai d_{ij} yang berada pada selang r semakin banyak, sehingga nilai *K-function* nya semakin besar, sedangkan jika data *point* membentuk pola *independent* dan regular, maka nilai d_{ij} yang berada pada selang r semakin sedikit, sehingga nilai *K-function* nya juga semakin kecil.

K-function digunakan untuk menganalisis pola persebaran *spatial point pattern* jika hasil uji *chi-squared* menyimpulkan bahwa data berasal dari proses yang stasioner, sedangkan jika hasil uji *chi-squared* menyimpulkan bahwa data berasal dari proses yang tidak stasioner, maka yang digunakan untuk menganalisis pola persebaran *spatial point pattern* adalah *inhomogeneous K-function*. Perbedaan antara *inhomogeneous K-function* dengan *K-function* yaitu adanya penambahan bobot untuk x_i sebesar $w_i = 1/\rho(x_i)$ sedangkan pasangan x_i dan x_j akan ditambahkan bobot sebesar $w_{ij} = 1/\rho(x_i)\rho(x_j)$. Persamaan 2.12 adalah rumus yang digunakan untuk menghitung *inhomogeneous K-function*.

$$\hat{K}_{inhom}(r) = \frac{1}{D^p|B|} \sum_{i=1}^{n} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \mathbf{I}\left\{\frac{\|u_i - u_j\|}{\hat{\rho}(u_i)\hat{\rho}(u_j)}\right\} e(u_i; u_j; r), \qquad 2.12$$

dengan I akan bernilai 1 jika jarak antar titik berada pada selang r dan 0 jika jika jarak antar titik berada diluar selang r, $e(u_i; u_j; r)$ adalah bobot *edge correction* dan $\hat{\rho}(u_i)$ adalah nilai estimasi dari $\rho(u_i)$. Visualisasi *Ripley K-function* untuk tiap pola data dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Visualisasi *K-function* untuk Regular (Kiri), *Independen* (Tengah), dan *Cluster* (Kanan)

Garis lurus pada Gambar 2.3 menunjukan garis $\widehat{K}$ sedangkan garis putus-putus menunjukkan garis Poisson. Jika posisi garis $\widehat{K}$ berada di bawah garis Poisson, maka *point pattern* akan membentuk pola reguler. Jika posisi garis $\widehat{K}$ berada tepat di garis Poisson, maka *point pattern* akan membentuk pola independen, sedangkan jika posisi garis $\widehat{K}$ berada di atas garis Poisson, maka *point pattern* akan membentuk pola *cluster*.

2.4 Estimasi Parameter

Pada penelitian ini, estimasi parameter dilakukan untuk menaksir nilai parameter $\boldsymbol{\beta}$ di *first order* dan juga parameter model *cluster* yaitu κ di *second order*.

2.4.1 *Berman Turner*

Numerical Quadrature adalah metode perhitungan yang sederhana dan efisien dimana

$$\int_B f(u)\,\mathrm{dx} = \sum_i w_i f(u_i) \qquad 2.13$$

Berman dan Turner pada tahun 90-an, mengembangkan metode *numerical quadrature* untuk *inhomogeneous Poisson point process* agar fungsi *likelihood* nya mendekati fungsi *likelihood* dari *Generalized Linier Model* Poisson.

Jika **X** adalah model *inhomogeneous Poisson point process* dengan parameter $\boldsymbol{\beta}$, maka fungsi *likelihood* untuk mengestimsasi $\boldsymbol{\beta}$ dapat dilihat pada persamaan 2.14.

$$L(\boldsymbol{\beta};\mathbf{u}) = \rho(\boldsymbol{\beta};u_1)...\rho(\boldsymbol{\beta};u_n)\exp(\int_B (1-\rho(u;\boldsymbol{\beta}))\,\mathrm{du}). \quad 2.14$$

Bentuk log-*likelihood* 2.14 ditunjukkan pada persaman 2.15

$$\log L(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^{n} \log \rho(\boldsymbol{\beta};u_i) - \int_B \rho(u;\boldsymbol{\beta})\,\mathrm{du}\,. \quad 2.15$$

Menggunakan pendekatan *numerical quadrature* pada persamaan 2.13, maka diperoleh

$$\int_B \rho(u;\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^{n+q} \rho(u_i;\boldsymbol{\beta})w_i, \quad 2.16$$

dengan q adalah banyaknya *dummy point* dan n adalah banyak data *point* sehingga persamaan 2.15 dapat dituliskan menjadi

$$\log L(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^{n+q} (\mathrm{I}_i \log \rho(u_i;\boldsymbol{\beta}) - \rho(u_i;\boldsymbol{\beta})\mathrm{w}_i)\,, \quad 2.17$$

dengan nilai $\mathrm{I}_j = 1$ jika u_j adalah data *point* dan $\mathrm{I}_j = 0$ jika u_j adalah *dummy point*.

2.4.2 *Second-Order Composite Likelihood*

Second-Order Composite Likelihood adalah metode estimasi parameter yang digunakan untuk mendapatkan nilai estimator parameter *cluster* $\boldsymbol{\theta} = (\kappa;\omega)^{\mathrm{T}}$. Fungsi *second order composite likelihood* dibangun dari semua pasangan titik data u_i u_j yang ditunjukkan pada persamaan 2.18 (Baddeley dkk., 2015).

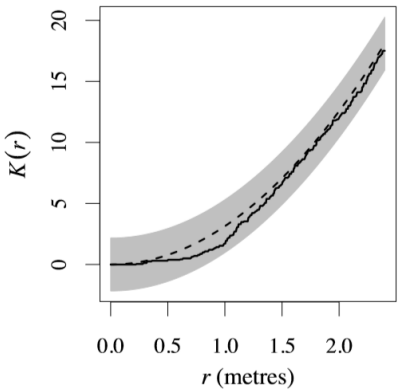
$$\log \mathrm{CL}(\boldsymbol{\theta}) = \sum_i \sum_{i \neq j} [\log \rho^{(2)}(u_i,u_j;\boldsymbol{\theta}) - \log \int_B \int_B \rho^{(2)}(u_i,u_j;\boldsymbol{\theta})\mathrm{d}u_i\mathrm{d}u_j] \quad 2.18$$

Hasil penurunan persamaan 2.18 terhadap $\boldsymbol{\theta}$ dituliskan pada persamaan 2.19.

$$\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\theta}} \log CL(\boldsymbol{\theta}) = \sum_i \sum_{j \neq i} \frac{\kappa_2(u_i, u_j; \boldsymbol{\theta})}{\rho^{(2)}(u_i, u_j; \boldsymbol{\theta})} - \sum_i \sum_{j \neq i} \frac{\langle \kappa_2 \rangle}{\langle \rho^{(2)} \rangle}, \qquad 2.19$$

2.5 Kebaikan Model

Kebaikan model pada penelitian ini dicek menggunakan plot *envelope K-function*, dimana plot *K-function* dari data *point* asli akan dibandingkan dengan hasil dari simulasi model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process*. Suatu model dikatakan baik untuk memodelkan data tertentu jika plot *K-function* data *point* asli berada pada interval *envelope K-function*. Gambar 2.4 menunjukan contoh visualisasi dari plot *envelope K-function* data *Swedishpines* (Baddeley dkk., 2015).



Gambar 2. 4 Visualisasi *Envelope K-function* : Contoh *Data Swedishpines*

Gambar 2.4 menunjukkan bahwa plot *K-function* data *Swedishpines* berada pada interval *envelope K-function*, sehingga model yang digunakan baik untuk memodelkan data *Swedishpines*.

2.6 Tinjauan Non Statistik

Tinjauan non statistik pada penelitian ini meliputi variabel yang digunakan dalam penelitian yaitu gempabumi, gunung berapi, sesar, dan subduksi.

2.6.1 Gempabumi

Gempabumi adalah peristiwa bergetarnya bumi. Berdasarkan proses kemunculannya, gempabumi dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu *foreshock*, *mainshock*, *aftershock*, dan *earthquake swarm*. *Foreshock* adalah gempa-gempa yang terjadi sebelum gempa utama atau *mainshock* dan *aftershock* adalah gempa-gempa susulan yang terjadi setelah gempa utama (Hidayat dan Santoso, 1997), sedangkan *earthquake swarm* atau gempabumi *swarm* adalah gempabumi yang terjadi secara terus menerus tetapi tidak terdapat gempabumi utama yang signifikan. Berdasarkan penyebab terjadinya, gempabumi dikelompokkan menjadi beberapa macam yaitu gempabumi tektonik, gempabumi vulkanik, gempabumi lokal, gempabumi jatuhan meteor, dan gempabumi buatan manusia. Gempabumi tektonik adalah gempabumi yang disebabkan oleh pergerakan lapisan batuan pada kulit bumi secara tiba-tiba akibat pergerakan lempeng-lempeng tektonik, gempabumi vulkanik adalah gempabumi yang disebabkan oleh aktivitas gunung berapi, gempabumi lokal adalah gempabumi yang terjadi jika suatu gua di dearah batuan karst atau lokasi pertambangan runtuh, gempabumi jatuhan meteor terjadi karena meteorit atau benda langit jatuh ke permukaan bumi, sedangkan gempabumi buatan manusia adalah gempabumi yang terjadi karena aktivitas manusia seperti peledakan dinamit, nuklir, atau bom (Sunarjo dkk., 2012).

Tidak sama seperti bencana alam yang lain, gempabumi terjadi secara mendadak tanpa ada tanda-tanda sebelumnya (Sunarjo dkk., 2012) dan belum dapat diprediksi kapan dan dimana akan terjadi gempabumi (BMKG, 2017). Akibat utama yang ditimbulkan gempabumi adalah hancurnya bangunan dan jatuhnya korban jiwa karena tertimpa reruntuhan bangunan (ESDM, 2013), bahkan gempabumi juga bisa memicu terjadinya bencana alam lain

yaitu tanah longsor dan tsunami, jika sumbernya berada di dasar lautan.

2.6.2 Gunung Berapi

Gunung berapi muncul akibat magma dari dalam bumi bergerak naik ke atas permukaan. Naiknya magma ke permukaan disebabkan oleh dua hal yaitu aktifitas tektonik dan konduksi panas. Naiknya magma ke permukaan disebabkan oleh adanya aktifitas tektonik yang bermula dari ketidakseimbangan litostatik di dalam bumi. Sedangkan naiknya magma karena konduksi panas terjadi karena aliran panas dari kantung magma ke lapisan batuan terdekat. Aliran panas ini berisi gas, air tanah atau fluida yang disebut sebagai kantung fluida. Konduksi panas yang terjadi secara terus menerus menyebabkan terjadinya peningkatan suhu dan tekanan pada kantung fluida. Sehingga suatu saat tidak dapat menahan tekanan gas. Akibatnya magma mengalir dan terjadilah erupsi (Setiawan, 2014).

2.6.3 Sesar

Sesar adalah struktur rekahan yang telah mengalami pergeseran. Umumnya disertai oleh strukur yang lain seperti lipatan, rekahan, dsb. Sesar dapat dibagi kedalam beberapa jenis tergantung pada arah relatif pergeserannya. Selama sesar diangg-ap suatu bidang datar, maka konsep jurus dan kemiringan juga dapat dipakai, dengan demikian jurus dan kemiringan dari suatu bidang sesar dapat diukur dan ditentukan. Jenis sesar dapat digolongkan menjadi *dip slip faults, normal faults, horsts & grabens, half-grabens, reverse faults, a thrust fault, strike slip faults, dan transform-faults* (Noor, 2009).

2.6.4 Subduksi

Subduksi merupakan pertemuan dua lempeng akibat adanya pergerakan lempeng yang saling mendekat (lempeng benua dan

lempeng samudera). Kedua lempeng yang bergerak saling menekan, sehingga terjadi pembengkokan pada lempeng samudera (sudut subduksi) yang kemudian menyusup ke bawah lempeng benua (Akmam, 2011).

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Sumber Data

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder berupa koordinat data gempa di pulau Sumatera pada rentang tahun 2009-2018 dengan magnitudo ≥ 4 yang diunduh dari laman web BMKG, koordinat sesar dan koordinat subduksi diperoleh dari Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017, sedangkan koordinat gunung berapi diperoleh dari laman web Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG). Batas *Observation window* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu [104.517,119.295] × [-6.518,7.379] (100 km).

3.2 Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Variabel Penelitian

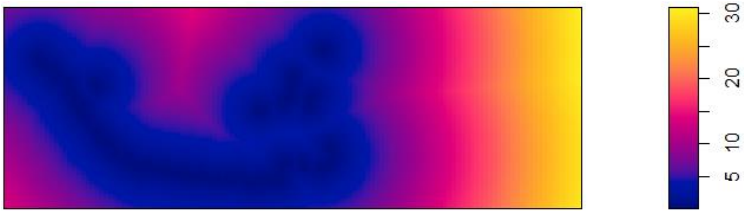
No	Variabel	Keterangan
1	Y	Koordinat gempabumi
2	X_1	Jarak gempa ke sesar terdekat
3	X_2	Jarak gempa ke subduksi terdekat
4	X_3	Jarak gempa ke gunung berapi terdekat

Struktur data yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.2.

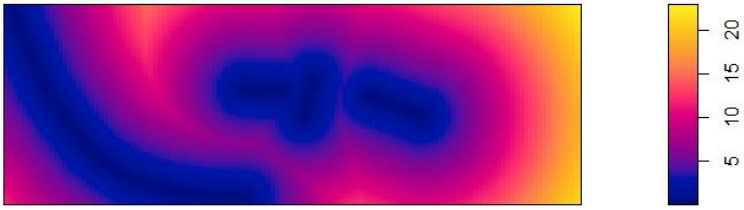
Tabel 3. 2 Struktur Data Jarak Gempabumi Terhadap Variabel

Koordinat Gempa	Jarak Gempa ke Sesar	Jarak Gempa ke Subduksi	Jarak Gempa ke Gunung
Y_1	$X_{1,1}$	$X_{2,1}$	$X_{3,1}$
Y_2	$X_{1,2}$	$X_{2,2}$	$X_{3,2}$
⋮	⋮	⋮	⋮
Y_n	$X_{1,n}$	$X_{2,n}$	$X_{3,n}$

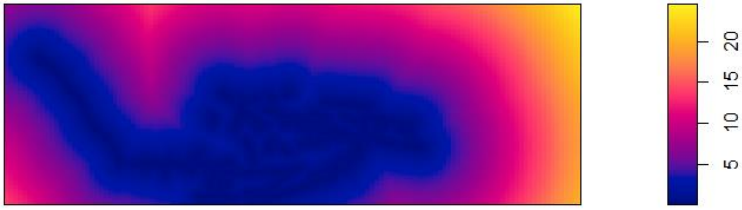
Gambar 3.1 menunjukkan visualisasi struktur data pada Tabel 3.1 jika disajikan dalam bentuk *pixel image*.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. 1 *Pixel Image* (a) : Jarak Titik Gempa ke Gunung Berapi dalam derajat, (b) : Jarak Titik Gempa ke Zona Subduksi dalam derajat , (c) : Jarak Titik Gempa ke Sesar dalam derajat

3.3 Langkah Analisis

Langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini untuk mencapai tujuan penelitian yaitu sebagai berikut.

1. Mengumpulkan data.
2. Melakukan *pre-processing* data dengan memotong data berdasarkan batas *obseravtion window* dan memfilter kekuatan gempa.
3. Membuat visualisasi data.
4. Melakukan analisis eksplorasi data dengan tahapan sebagai berikut.
   a. Menguji stasioneritas data menggunakan uji *chi-squared.*
   b. Jika hasil pengujian pada tahap sebelumnya memberikan kesimpulan bahwa data dihasilkan dari proses yang tidak stasioner, maka analisis korelasi spasial untuk mengetahui pola persebaran *point pattern*.dilakukan menggunakan *inhomogeneous K-function* yang dapat dilihat pada persamaan 2.12 sedangkan jika hasil pengujian pada tahap sebelumnya memberikan kesimpulan bahwa data dihasilkan dari proses yang stasioner, maka analisis korelasi spasial untuk mengetahui pola persebaran *point pattern* dilakukan menggunakan *K-function* yang dapat dilihat pada persamaan 2.11.
5. Mengestimasi parameter dengan pilihan kondisi sebagai berikut.
   a. Jika hasil pengujian pada tahap sebelumnya memberikan kesimpulan bahwa data dihasilkan dari proses yang stasioner dan *point pattern* membentuk pola yang independen, maka estimasi parameter dilakukan menggunakan pendekatan *Berman Turner* yang dapat dilihat pada persamaan 2.17 dimana nilai yang diestimasi yaitu hanya nilai *intercept* nya saja.

b. Jika hasil pengujian pada tahap sebelumnya memberikan kesimpulan bahwa data dihasilkan dari proses yang stasioner dan *point pattern* membentuk pola yang reguler maupun *cluster*, maka estimasi parameter dilakukan menggunakan pendekatan *Berman Turner* yang dapat dilihat pada persamaan 2.17 dimana nilai yang diestimasi yaitu hanya nilai *intercept* nya saja dan *maximum second order composite likelihood* yang dapat dilihat pada persamaan 2.18 untuk mengestimasi nilai parameter yang berhubungan dengan *cluster* yaitu κ .

c. Jika hasil pengujian pada tahap sebelumnya memberikan kesimpulan bahwa data dihasilkan dari proses yang tidak stasioner dan *point pattern* membentuk pola yang independen, maka estimasi parameter dilakukan menggunakan pendekatan *Berman Turner* yang dapat dilihat pada persamaan 2.17 dimana nilai yang diestimasi yaitu β_i dimana $i = 1, 2, .., m$ dan m adalah banyaknya kovariat.

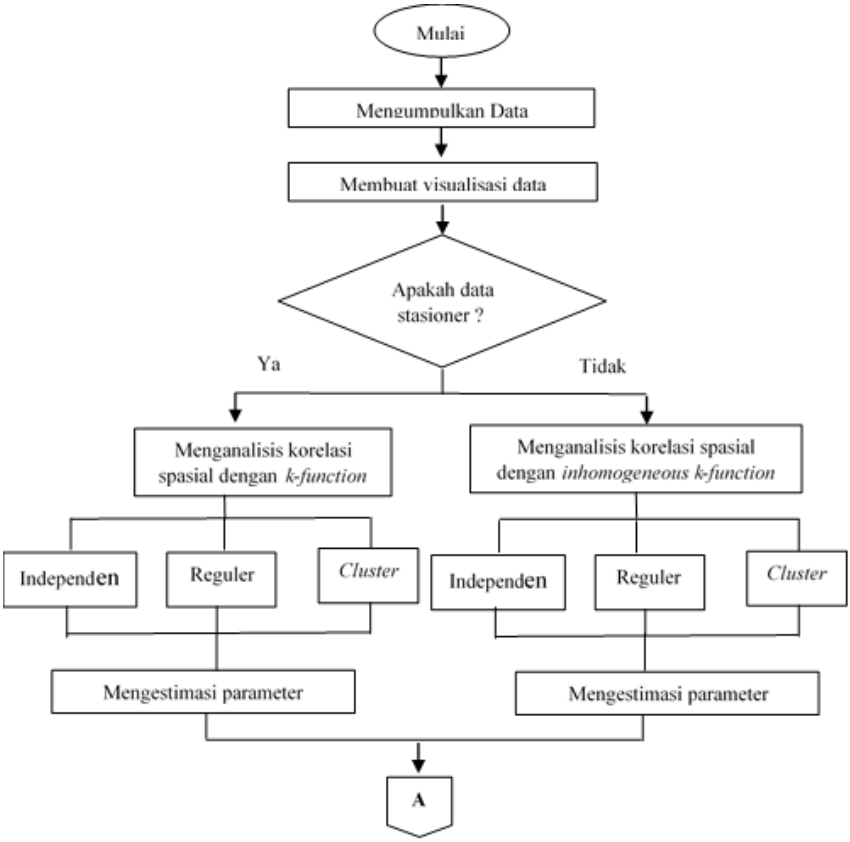
d. Jika hasil pengujian pada tahap sebelumnya memberikan kesimpulan bahwa data dihasilkan dari proses yang tidak stasioner dan *point pattern* membentuk pola yang reguler maupun *cluster*, maka estimasi parameter dilakukan menggunakan pendekatan *Berman Turner* yang dapat dilihat pada persamaan 2.17dimana nilai yang diestimasi yaitu β_i dimana $i = 1, 2, .., m$ dan m adalah banyaknya kovariat dan *maximum second order composite likelihood* yang dapat dilihat pada persamaan 2.18 untuk mengestimasi nilai parameter yang berhubungan dengan *cluster* yaitu κ .

6. Mengecek kebaikan model dengan melihat plot *envelope K-function*.
7. Menyusun dan menginterpretasi model.

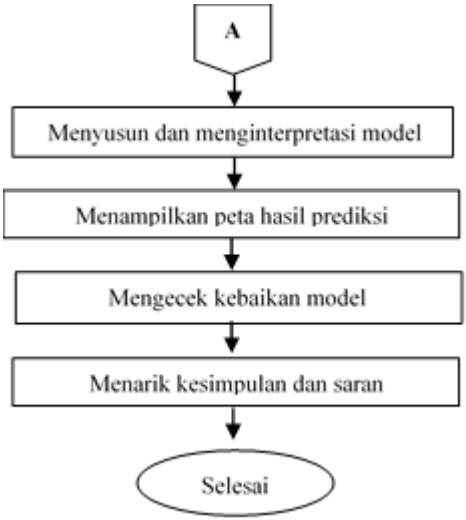
8. Menampilkan peta hasil prediksi.
9. Menarik kesimpulan dan saran.

3.4 Diagram Alir Langkah-langkah Analisis

Diagram alir dari langkah-langkah dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.2



Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian



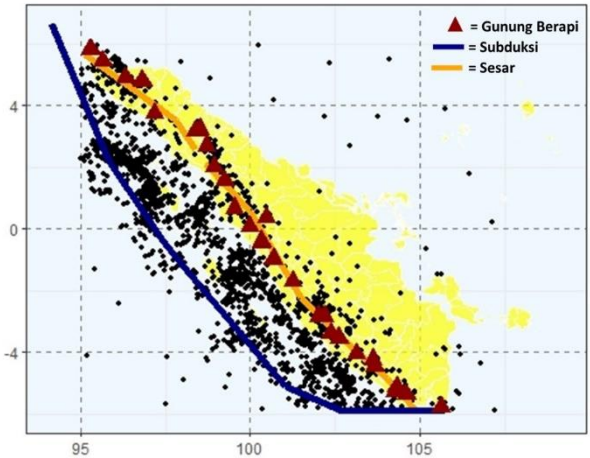
Gambar 3. 3 Diagram Alir Penelitian (Lanjutan)

BAB IV
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Bagian ini membahas karakteristik persebaran titik gempabumi di pulau Sumatera berdasarkan faktor-faktor yang diduga mempengaruhi yaitu sesar, subduksi , dan gunung berapi . Setelah itu, akan dilakukan uji *chi-squared* dan analisis korelasi spasial untuk mengetahui pola persebaran data gempa, pemodelan menggunakan *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process*, pengecekan kebaikan model dengan plot *envelope K-function*, hingga penyusunan peta prediksi risiko gempa di pulau Sumatera.

4.1 Karakteristik Gempabumi Berdasarkan Faktor Geologi Sesar, Subduksi, dan Gunung Berapi

Sepanjang tahun 2009-2018, sebanyak 5937 gempabumi terjadi di wilayah pulau Sumatera dan 2153 diantaranya adalah gempa besar dengan kekuatan gempa ≥ 4 magnitudo. Persebaran titik gempa besar yang terjadi di pulau Sumatera dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Persebaran Gempa Besar di Pulau Sumatera Tahun 2009-2018 Magnitudo ≥ 4

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa titik-titik terjadinya gempabumi cenderung mengelompok di wilayah-wilayah tertentu yaitu di wilayah yang berdekatan dengan zona subduki, sesar, dan gunung berapi. Pernyataan tersebut didukung dengan penelitian tentang geologi dan kegempaan yang pernah dilakukan di pulau Sumatera, dimana pusat gempabumi di pulau Sumatera terdapat pada zona-zona tertentu diantaranya yaitu sesar sumatera, zona subduki, dan disekitar *vulcanic linement* akibat aktivitas magma. Menurut BMKG, daerah-daerah rawan gempabumi di pulau Sumatera yaitu Lampung, Sumatera Barat, Bengkulu, Aceh, dan Sumatera Utara.

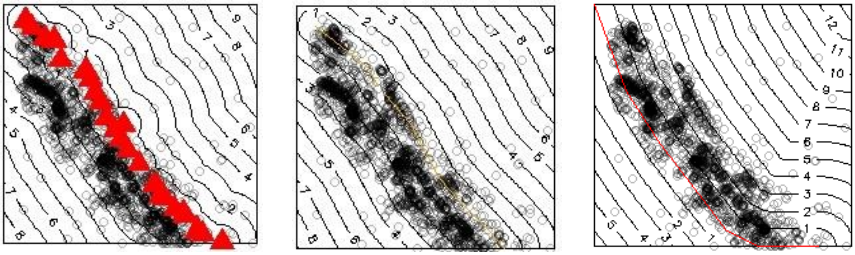
Pada Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa sebagian besar titik gempa yang terjadi di Aceh berada di daratan. Hal tersebut disebabkan karena wilayah provinsi Aceh diapit oleh dua segmen yaitu segmen Aceh dan segmen Seulimeum. Selain itu, pulau Simuelue yang berada di provinsi Aceh juga merupakan daerah yang rawan gempa dan tsunami dikarenakan letaknya yang berada dekat dengan zona subduksi. Menurut catatan BMKG, gempa besar yang terjadi di Simuelue terakhir terjadi pada tahun 2008 dengan kekuatan sebesar 7.3 M yang menyebabkan kerusakan dan menelan korban jiwa.

Provinsi Sumatera Utara juga merupakan daerah rawan gempabumi di pulau Sumatera dimana Gambar 4.1 menunjukkan bahwa sebagian besar titik gempanya berada di laut yaitu di sekitar pulau Nias. Hal tersebut disebabkan karena kondisi geografis pulau Nias yang berada dekat dengan zona subduksi. Wilayah rawan gempa di pulau Sumatera yang lain adalah provinsi Sumatera Barat, dimana sebagian besar titik gempabumi berada diantara kota Padang dan Pulau Mentawai. Salah satu penyebab tingginya risiko gempabumi di Sumatera Barat yaitu karena adanya 7 segmen sesar Sumatera yang berada di Sumatera Barat yaitu segmen Siulak, segmen Suliti, segmen Sumani, segmen Sianok, segmen Sumpur, segmen Barumun, dan segmen Angkola.

Selain itu, persebaran titik gempabumi pada Gambar 4.1 juga menunjukan adanya pengelompokkan titik-titik gempa di

wilayah provinsi Bengkulu dan Lampung, artinya kedua wilayah tersebut juga merupakan wilayah rawan gempa di pulau Sumatera. Menurut data yang dihimpun dari BMKG sepanjang tahun 2016, telah terjadi gempabumi sebanyak 346 kali di provinsi Bengkulu dan hingga bulan Juli 2018 provinsi Lampung masih sering dilanda gempabumi dengan kekuatan besar. Hal tersebut diakibatkan adanya aktifitas subduksi lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia yang berada di laut dan aktifitas sesar Sumatera yang berada di darat.

Risiko gempabumi yang tinggi di pulau Sumatera dipengaruhi oleh kondisi geografisnya yang dilalui oleh zona subduksi, sesar, dan jalur gunung berapi. Jarak persebaran titik gempa terhadap zona subduksi, sesar, dan gunung berapi ditunjukkan pada Gambar 4.2.



(a) **(b)** **(c)**

Gambar 4. 2 Jarak Titik Gempa Terhadap (a) Gunung Berapi, (b) Sesar, (c) Zona Subduksi (dalam 100km)

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa jarak titik gempabumi terhadap gunung berapi berada pada radius 0-700 km, jarak titik gempabumi terhadap sesar berada pada radius 0-800 km, dan jarak titik gempabumi terhadap zona subduksi berada pada radius 0-1100 km. Jika dibandingkan dengan gunung berapi dan sesar, sebagian besar titik gempabumi berada dekat dengan zona subduksi dengan radius 0-300 km. Hal tersebut menunjukkan bahwa daerah-daerah yang jaraknya berada pada radius 0-300 km dari zona subduksi risiko gempanya yang lebih tinggi daripada daerah yang lain. Menurut peta wilayah pulau Sumatera, daerah-

daerah yang berada dekat dengan zona subduksi diantaranya yaitu pulau Simeuleu, Nias, dan kepulauan Mentawai.

4.2 Uji *Chi-Squared*

Uji *Chi-Squared* dilakukan untuk mengetahui apakah data gempabumi mengikuti pola stasioner atau tidak. Sebelum dilakukan pengujian, *observation window* terlebih dahulu dibagi menjadi 104 *quadrat count* lalu dihitung banyaknya titik gempabumi pada tiap-tiap *quadrat count* seperti pada Gambar 4.3.

2	0	0	1	0	0	0	0
23	89	2	0	1	1	0	0
28	57	3	1	0	0	1	0
13	33	29	1	1	1	1	0
63	154	71	4	0	1	0	0
15	151	44	42	1	0	0	1
0	63	91	39	1	0	0	1
0	16	42	54	4	2	1	0
1	6	24	181	11	4	2	0
0	1	7	97	92	10	1	0
0	0	7	93	77	18	2	1
1	0	4	15	96	59	4	2
0	0	1	4	37	117	25	4

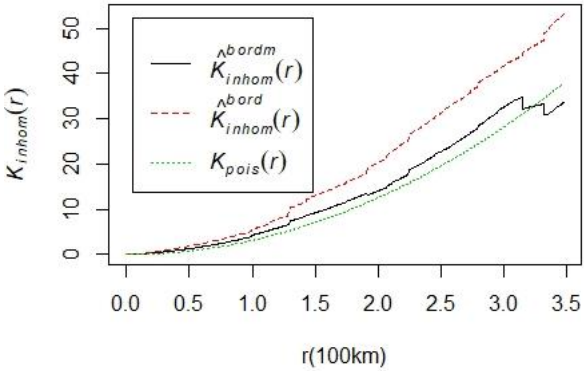
Gambar 4. 3 *Quadrat Count* Data Gempa di Pulau Sumatera

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa banyaknya titik gempabumi pada tiap *quadrat count* sangat berbeda satu dan lainnya , sehingga diduga data gempabumi mengikuti pola yang tidak stasioner. Dengan pengujian menggunakan taraf signifikansi sebesar 0.05, diperoleh *p-value* sebesar < 2.2e-16. Karena *p-value* < 0.05, maka diperoleh kesimpulan bahwa data gempabumi di pulau Sumatera mengikuti pola yang tidak stasioner, artinya dimungkinkan terdapat faktor-faktor yang secara signifikan mempengaruhi jumlah terjadinya gempabumi yang menyebabkan banyaknya kejadian gempabumi di tiap daerah pulau Sumatera berbeda.

4.3 Analisis Korelasi Spasial

Analisis korelasi spasial dilakukan untuk mengetahui pola persebaran gempabumi. Korelasi spasial dilakukan dengan melihat

plot *inhomogeneous K-function* karena hasil pengujian menggunakan uji *Chi-Squared* menyimpulkan bahwa data gempabumi mengikuti pola yang tidak stasioner. Plot *inhomogeneous K-function* data gempabumi di pulau Sumatera dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 *Plot inhomogeneous K-Function* Data Gempa

Gambar 4.4 menunjukkan garis *inhomogeneous K-Function* data gempabumi yang berwarna merah berada diatas garis *Poisson process* yang berwarna hijau, artinya persebaran data gempabumi di pulau Sumatera membentuk pola *cluster*. Posisi *line* plot *inhomogeneous K-Function* data gempabumi yang posisinya tidak terlalu jauh diatas garis *Poisson* memungkinkan bahwa efek inhomogen lebih besar dari *cluster.*

4.4 Pemodelan Data Gempabumi di pulau Sumatera Menggunakan Model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process*

Estimasi parameter untuk pemodelan *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* pada penelitian ini dilakukan dengan dua tahap karena hasil uji *Chi-Squared* menyimpulkan bahwa data gempabumi di pulau Sumatera mengikuti pola yang tidak stasioner dan hasil analisis korelasi spasial menunjukkan bahwa titik-titik gempabumi membentuk pola *cluster*, sehingga ada dua parameter yang harus diestimasi yaitu parameter **β** yang diestimasi

menggunakan pendekatan *Berman-Turner* dan parameter κ yang diestimasi menggunakan metode *second order composite likelihood*.

Hasil pemodelan data gempabumi di pulau Sumatera menggunakan model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* dengan taraf signifikansi 5% (Lampiran 10) menyimpulkan bahwa faktor geografis jarak sesar dan subduksi signifikan mempengaruhi risiko kejadian gempabumi di pulau Sumatera, sedangkan faktor jarak gunung berapi tidak signifikan mempengaruhi risiko terjadinya gempabumi di pulau Sumatera. Artinya, risiko gempabumi tiap daerah di pulau Sumatera berbeda-beda, tergantung pada jarak daerah tersebut ke sesar dan subduksi. Karena variabel jarak ke gunung berapi tidak signifikan, maka dilakukan pemodelan ulang tanpa memasukkan faktor jarak gunung berapi dan diperoleh nilai estimator untuk parameter κ, $\boldsymbol{\beta}$ dan ω yang disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Nilai Estimasi dari $\hat{\kappa}$, $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ dan $\hat{\omega}$

Koefisien	Estimasi	1/Exp (Beta)
$\hat{\kappa}$	1.8511104	
$\hat{\omega}$	0.1530991	
$\hat{\beta}_0$	4.6894181	0.009192
$\hat{\beta}_1$ (Sesar)	-0.5235562	1.68802
$\hat{\beta}_2$ (Subduksi)	-0.6361314	1.889158

Tabel 4.1 menunjukkan bahwa nilai $\hat{\kappa}$ yang diperoleh dari hasil estimasi yaitu 1.8511104 dan $\hat{\omega}$ yaitu 0.1530991, artinya 380 gempa utama diperkirakan terjadi di wilayah pulau Sumatera, dengan risiko gempa susulan pada masing-masing gempa utama dipengaruhi oleh kondisi geografis yaitu jarak lokasi terjadinya gempa utama dengan sesar dan zona subduksi, dimana titik-titik gempa susulan tersebar di sekitar gempa utama dengan standar deviasi sebesar 15.30 km. Setelah mengestimasi parameter,

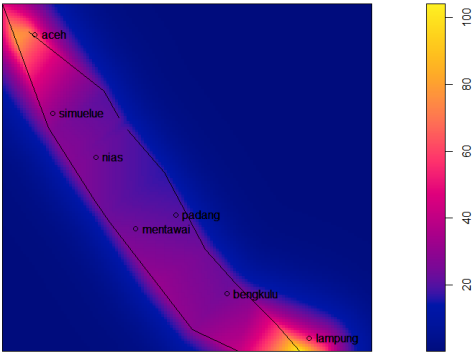
diperoleh model intensitas dari *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* sebagai berikut.

$$\hat{\rho}(u) = 1.85 \times \exp(4.69\text{-}0.524X_1(u)\text{-}0.636X_2(u)) \quad 4.1$$

Persamaan 4.1 menunjukkan bahwa risiko gempabumi di suatu lokasi dipengaruhi oleh jarak terhadap sesar dan zona subduksi, dimana bila jarak suatu lokasi ke sesar Sumatera mendekat 100 km, maka risiko terjadinya gempabumi di lokasi tersebut meningkat hampir dua kali lipat (1.7 kali), sedangkan bila jarak suatu lokasi ke zona subduksi mendekat 100 km, maka risiko terjadinya gempabumi di lokasi tersebut meningkat hampir dua kali lipat (1.9 kali).

4.5 Peta Prediksi Risiko Gempabumi di Pulau Sumatera

Prediksi risiko gempa di pulau Sumatera menggunakan model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* ditunjukkan pada Gambar 4.5.



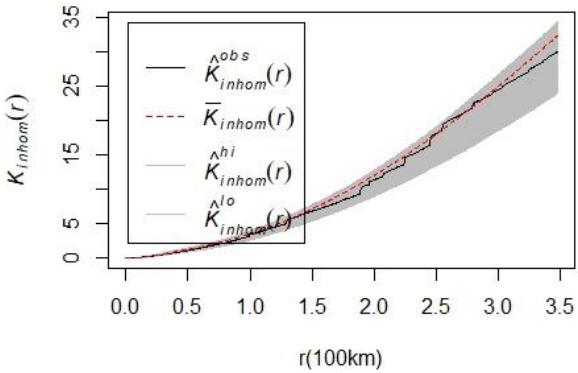
Gambar 4. 5 Plot Hasil Prediksi *Intensity* Gempa di Pulau Sumatera

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa risiko gempa di pulau Sumatera cenderung tinggi di daerah yang letaknya diapit oleh sesar dan zona subduksi yaitu di bagian pinggir pulau Sumatera yang berbatasan dengan samudra Hindia dan diprediksi paling tinggi di wilayah yang berada di bagian atas dan bawah pulau Sumatera. Daerah-daerah di pulau Sumatera yang berada di

wilayah risiko gempa tinggi dan sangat tinggi diantaranya yaitu provinsi Aceh (Banda Aceh dan pulau Simuelue), Lampung, Sumatera Utara (pulau Nias), Sumatera Barat (kepulauan Mentawai dan kota Padang), dan Bengkulu. Hal tersebut terjadi karena bagian atas dan bawah pulau Sumatera merupakan wilayah pertemuan antara sesar dan zona subduksi, sedangkan wilayah pinggir pulau Sumatera yang berbatasan dengan samudera Hindia berdekatan dengan zona subduksi.

4.6 Pengecekan Kebaikan Model

Kebaikan model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* dalam memodelkan data gempabumi di pulau Sumatera dapat dilihat dari plot *envelope K-function* pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 *Plot Envelope K-Function* Model *Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process*

Gambar 4.6 menunjukkan plot *K-function* data gempa berada pada interval *envelope K-function*. Hal tersebut dapat dilihat dari Gambar 4.6, dimana garis hitam lurus berada pada area yang diarsir, artinya *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process* baik digunakan untuk memodelkan data gempabumi di pulau Sumatera tahun 2009-2018 dengan magnitudo ≥ 4. Perlu diperhatikan bahwa

pada radius diatas 250 km, ada kemungkinan model *underfit* karena interval *envelope K-function* pada Gambar 9 melebar kebawah.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis pada data gempa di pulau Sumatera didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Pesebaran kejadian gempabumi di pulau Sumatera mengelompok di daerah-daerah yang dekat dengan zona subduksi, sesar, dan gunung berapi, dimana sebagian besar gempa terjadi di radius 0-300 km dari zona subduksi. Daerah di pulau Sumatera yang rawan gempabumi karena lokasinya berdekatan dengan zona subduksi di samudra Hindia yaitu pulau Simuelue, pulau Nias, kepulauan Mentawai, Bengkulu, dan Lampung. Sedangkan daerah yang rawan gempa karena adanya aktifitas sesar yaitu provinsi Sumatera Barat dan Sumatera Utara.
2. Zona subduksi dan sesar adalah faktor geografis di pulau Sumatera yang secara signifikan mempengaruhi tingginya risiko gempa di pulau Sumatera, dimana setiap pengurangan 100 km jarak suatu lokasi terhadap zona subduksi akan mengakibatkan risiko gempa naik sebesar 1.9 kali lipat dan setiap pengurangan 100 km jarak suatu lokasi terhadap sesar akan mengakibatkan risiko gempa naik sebesar 1.7 kali lipat.
3. Daerah di pulau Sumatera yang diperdiksi rawan terjadi gempa adalah daerah yang terletak di bagian atas pulau Sumatera yaitu provinsi Aceh dan Sumatera Utara, bagian bawah pulau Sumatera yaitu Lampung, dan bagian pinggir pulau sumatera yang berbatasan dengan samudra Hindia yaitu provinsi Sumatera Barat dan Bengkulu.

5.2 Saran dan Rekomendasi

Berdasarkan hasil analisis serta kesimpulan yang diperoleh, terdapat beberapa saran untuk penelitian selanjutnya yaitu :

1. Penelitian ini berfokus pada gempabumi dengan magnitudo $\geq$ 4, untuk melakukan analisis perbedaan karakteristik kedalaman gempabumi, *multitype log-Gaussian Cox process* (Choirudin dkk., 2020) dapat dipertimbangkan sebagai penelitian lanjutan.
2. Hasil studi eksplorasi kondisi geografis di pulau Sumatera memungkinkan adanya korelasi yang tinggi antara jarak terdekat ke gunung berapi dan sesar karena letak gunung berapi di pulau Sumatera berada di sepanjang jalur sesar Sumatera. Penelitian yang mempertimbangkan adanya kasus multikolinieritas seperti *regresi ridge* (Choiruddin dkk.,2018) dapat diaplikasikan pada penelitian selanjutnya.

Rekomendasi yang dapat diberikan kedapa pemerintah dari hasil penelitian yaitu :

1. Pemerintah yang daerahnya termasuk daerah rawan gempa sebaiknya melakukan mitigasi dengan memetakan kota-kota yang sering menjadi pusat gempa berdasarkan data historis gempabumi.
2. Daerah yang berbatasan dengan samudra Hindia sebaiknya memasang alat untuk mendeteksi tsunami sehingga dapat digunakan sebagai peringatan dini bagi warga yang tinggal di daerah tersebut.
3. Mendirikan bangunan dengan *design* yang tahan gempa sehingga dapat mengurangi kerugian akibat kerusakan bangunan.

DAFTAR PUSTAKA

Akmam. (2011). *Subduksi Lempeng Indo-Australia pada Lempeng Eurasia di Pantai Barat Sumatera Barat.* Padang: FMIPA Universitas Negeri Padang.

Anwar, S., Stein, A., & van Genderen, J. L. (2012). Implementation of the marked Strauss point process model to the epicenters of earthquake aftershocks. *Advances in Geo-Spatial Information Science*, 125–139.

Baddeley, A., Rubak, E., & Turner, R. (2015). *Spatial Point Patterns: Methodology and Applications with R.* Florida: Chapman and Hall/CRC.

Bray, A., & Schoenberg, P.F. (2013). Assessment of Point Process Models for Earthquake Forecasting. *Institute of Mathemathical Statistics, 28(4)*, 510-520.

Choiruddin, A., Coeurjolly, J.-F., & Letué, F. (2018). Convex and non-convex regularization methods for spatial point process intensity estimation. *Electronic Journal of Statistics*, *12*(1), 1210–1255. https://doi.org/10.1214/18-EJS1408

Choiruddin, A., Cuevas-Pacheco, F., Coeurjolly, J.-F., & Waagepetersen, R. (2020a). Regularized estimation for highly multivariate log Gaussian Cox processes. Statistics and Computing, 30(3), 649-662.

Choiruddin, A., Aisah, Trisnisa, F., & Iriawan, N. (2020b). Modeling of earthquake epicenters in Sulawesi and Maluku by inhomogeneous Cox point processes: Quantifying the effect of geological factor, Submitted.

Ihsan, M. (2008). *Analisa ketahanan gempa.* Depok: Universitas Indonesia.

Kementerian ESDM. (2013). *Pengenalan Gempa Bumi.* Jakarta : Kementerian ESDM.

Kementerian PUPR. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017.* Bandung: Kementerian PUPR.

Møller, J., & Waagepetersen, R. P. (2007). Modern statistics for

spatial point process. *Scandinavian Journal of Statistics*, *34*(4),643–684.https://doi.org/10.1111/j.1467-9469.2007.00569.x

Møller, J., & Waagepetersen, R. P. (2004). *Statistical Inference and Simulation for Spatial Point Process.* Florida: Chapman and Hall/CRC.

Noor, D. (2009). *Pengantar Geologi.* Aceh: Universitas Syiah Kuala.

Sakdiyah, K., & Choiruddin, A.(2020). Model Inhomogeneous Log Gaussian Cox Process (LGCP) untuk Pemetaan Risiko Gempabumi Di Pulau Sumatera,Submitted.

Setiawan, C. (2014). *Term Gunung Berapi : Tinjauan Secara Leksikologi.* Yogyakarta: Fakultas Bahasa dan Seni Universitas Negeri Yogyakarta.

Siino, M., Adelfio, G., Mateu, J., Chiodi, M., & D'Alessandro, A. (2017). Spatial pattern analysis using hybrid models: an application to the Hellenic seismicity. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *31*(7), 1633–1648. https://doi.org/10.1007/s00477-016-1294-7

Sunarjo, Gunawan, & Pribadi. (2012). *Gempabumi Edisi Populer.* Jakarta: BMKG.

Trisnisa, F., Metrikasari, R., Rabbanie, R., Sakdiyah, K., & Choiruddin, A. (2019). Model Inhomogeneous Spatial Cox Processes Untuk Pemetaan Risiko Gempabumi di Pulau Jawa. Inferensi, 2(2), 107-111.

Vere-Jones, D. (1969). Stochastic Models for Earthquake Occurrence. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*,*32*(1),1–45.https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1970.tb00814.x

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Gempa di Indonesia Tahun 2008-2019

Tanggal (GMT)	Lintang	Bujur	Kedalaman	Magnitudo
2009-01-01 03:45:01	-6.89	130.23093	98.5	5.13
2009-01-01 05:27:19	0.77	121.21667	10	4.92
2009-01-01 08:42:12	1.47	122.11909	10	4.53
2009-01-01 10:35:34	1.42	121.99382	10	5.04
2009-01-01 16:57:53	-4.42	101.07265	10	5.25
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2018-12-31 23:07:04	-10.34	116.38425	10	3.91
2018-12-31 23:09:27	3.08	126.57328	10	5.06
2018-12-31 23:19:48	-2.92	119.49917	10	2.67
2018-12-31 23:41:59	-9.49	124.65058	10	3.38
2018-12-31 23:48:51	2.09	98.99223	10	3.67

Lampiran 2. Data Gunung Berapi di Indonesia

No.	Nama	Lintang	Bujur
1	Agung	-8.342	115.508
2	Ambang	0.750	124.420
3	Arjuno-Welirang	-7.725	112.580
4	Awu	3.670	125.500
5	Banda Api	-4.525	129.871
6	Banua Wuhu	3.138	125.491
7	Batu Tara	-7.792	123.579
8	Batur	-8.242	115.375
9	Belirang-Beriti	-2.820	102.180
10	Besar	-4.430	103.670
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
120	Sangihe	3.583	125.508
121	Tompusu	1.266	124.855
122	Malupang Werirang	1.700	127.878
123	Mahawu	1.354	124.862
124	Karangetang	2.782	125.406
125	Jaboe	5.809	95.318
126	singgalang	-0.389	100.331
127	baluran	-7.846	114.362

Lampiran 3. Data Zona Subduksi

Lintang $_0$	Bujur $_0$	Lintang $_1$	Bujur $_1$
11.192	92.037	2.189	95.824
2.189	95.824	-0.385	97.447
-0.385	97.447	-1.223	98.021
-1.223	98.021	-3.164	99.520
-3.164	99.520	-5.080	101.022
-5.080	101.022	-6.526	102.678
-6.526	102.678	-8.571	105.748
-8.571	105.748	-10.130	110.410
-10.130	110.410	-10.902	114.790
-10.902	114.790	-11.019	119.780
-1.331	140.893	1.030	134.718
-1.201	126.786	3.075	127.966
1.898	119.670	1.702	124.297

Lampiran 4. Data Sesar

Lintang $_0$	Bujur $_0$	Lintang $_1$	Bujur $_1$
5.648	95.125	3.521	97.812
3.521	97.812	2.552	98.364
2.121	98.682	0.586	100.002
0.586	100.002	-2.193	101.484
-2.193	101.484	-3.419	102.571
-3.419	102.571	-4.865	104.016
-4.865	104.016	-6.858	104.884
-6.989	106.532	-6.919	107.721
-7.078	107.947	-7.428	107.676
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
-0.057	119.225	-0.946	119.268
-1.335	119.145	-2.839	118.564
-0.882	119.784	-1.757	120.064
-1.071	120.001	-1.259	120.169
-0.945	120.19	-1.017	120.497
-1.426	120.859	-1.94	121.3
-1.939	121.3	-2.875	121.311
-2.021	120.917	-2.321	122.282
-4.296	119.932	-6.316	120.725
-5.108	120.293	-6.859	120.65
1.289	117.162	0.444	118.292
-1.425	115.829	-2.018	115.85

Lampiran 5. *Syntax* R *Pre-Processing* Data

```
library(maptools)
library(sp)
library(spatstat)
library(dplyr)
# STEP 1 : INPUT DATA
setwd("C:/Users/OWNER/Documents/TA RIKA")
data1<-read.csv("Data Gempa Semua Magnitudo 2009 - 2018.csv")
sesar<-read.csv("sesar sumatera.csv")
megathrust<-read.csv("Subduksi Sumatera.csv")
gunungapi<-read.csv("gunung berapi aktif.csv")
# STEP 2  : Mendeteksi adanya point yang sama menggunakan dplyr
data2<-distinct(data1,latitude,longitude,.keep_all=TRUE)
# STEP 3 : MENG-CUT DATA SESUAI BATAS WINDOW
# Data Gempa
jj<-with(data2,which(latitude<(-5.872401),arr.ind=TRUE))
datasum2<-data2[-jj,]
ll<-with(datasum2,which(longitude>107.473420,arr.ind=TRUE))
datasumatera<-datasum2[-ll,]
datasumatera2<-filter(datasumatera,Magnitudo..SR.>=4)
# Data Gunung
jsm<-with(gunungapi,which(Latitude<(-5.872401),arr.ind=TRUE))
gunungsum2<-gunungapi[-jsm,]
lsm<-with(gunungsum2,which(Longitude>107.473420,arr.ind=TRUE))
gunungapiSM<-gunungsum2[-lsm,]
# STEP 4 : MEMBUAT WINDOW PULAU SUMATERA
windowgempaSM<-owin(xrange=c(94.160120,107.473420),yrange=c(-
5.872401,6.647552))
windownew<-rescale(windowgempaSM,100/111,"km")
area.window<-area.owin(windownew)
# STEP 5 : MEMBUAT PLANAR POINT PATTERN GEMPA BUMI
long<-datasumatera2$longitude*111/100
lat<-datasumatera2$latitude*111/100
gempaSM<-ppp(long,lat,window = windownew)
```

Lampiran 5. *Syntax R Pre-Processing* Data (Lanjutan)

```
# STEP 6 : MEMBUAT PLANAR POINT PATTERN GUNUNG
BERAPI
latgSM<-gunungapiSM$Latitude*111/100
longgSM<-gunungapiSM$Longitude*111/100
vulcanoSM<-ppp(longgSM,latgSM,window = windownew)
# STEP 7 : MEMBUAT PLANAR SEGMENT PATTERN SESAR
x0s<-sesar$x0*111/100
y0s<-sesar$y0*111/100
x1s<-sesar$x1*111/100
y1s<-sesar$y1*111/100
faultSM<-psp(y0s,x0s,y1s,x1s,window=windownew)
# STEP 8 : MEMBUAT PLANAR SEGMENT PATTERN SUBDUKSI
x0m<-megathrust$x0*111/100
y0m<-megathrust$y0*111/100
x1m<-megathrust$x1*111/100
y1m<-megathrust$y1*111/100
megathrustSM<-psp(y0m,x0m,y1m,x1m,window = windownew)
```

Lampiran 6. *Syntax* R Visualisasi Data

```
library(ggplot2)
library (rgdal)
library (rgeos)
library(maptools)
library(tmap)
library(sp)
library(ggthemes)
theme_set(theme_bw())
# STEP 1 : MEMANGGIL DATA
dsn <- system.file("SUMATERA",package="rgdal")
PG <- readOGR("theme1.shp")
AG <- fortify(PG)
# STEP 2 : PLOT PETA SHP
b<-ggplot()+ geom_polygon(data=AG, aes(long, lat, group =
group),colour = alpha("white", 0.5), size = 0.7, fill = 'yellow', alpha = 0.7)
+theme(panel.grid.major = element_line(color = "grey50", linetype =
"dashed", size = 0.5),panel.background = element_rect(fill = 'aliceblue'))
```

Lampiran 6. *Syntax* R Visualisai Data (Lanjutan)

```
# STEP 3 : MENAMBAH POIN GEMPA
c<-
b+geom_point(data=datasumatera2,aes(x=longitude,y=latitude),size=1)
# STEP 4 : MENAMBAH SEGMEN SESAR
g<-
c+geom_segment(data=sesar,aes(x=y0,y=x0,xend=y1,yend=x1),size=2,c
olour = "brown")
# STEP 5 : MENAMBAH SEGMEN SUBDUKSI
h<-
g+geom_segment(data=megathrust,aes(x=y0,y=x0,xend=y1,yend=x1),siz
e=2,colour = "darkblue")
# STEP 6 : MENAMBAH POIN GUNUNG
d<-
h+geom_point(data=gunungapiSM,aes(x=Longitude,y=Latitude),size=4,
pch=17,col="darkred")+theme(axis.title.x=element_blank(),axis.title.y=el
ement_blank())
```

Lampiran 7. *Syntax* R Eksplorasi Data

```
# UJI STASIONERITAS
# STEP 1 : MEMBAGI OBSERVATION WINDOW MENJADI
BEBERAPA QUADRAT COUNT
gridgempaSM<-quadratcount(gempaSM,8,13)
ujihomogenitas<-quadrat.test(gridgempaSM)
ujihomogenitas
plot(gridgempaSM)
# STEP 2 : MENGANALISIS KORELASI SPASIAL
ind.test<-Kinhom(gempaSM)
plot(ind.test,xlab=”r(100km)”)
```

Lampiran 8. *Syntax* R Pemodelan

```
# PEMODELAN
# STEP 1 : MENGHITUNG JARAK TITIK GEMPA KE VARIABEL (
SESAR, SUBDUKSI, GUNUNG BERAPI )
# Jarak Gempa Ke Gunung Berapi
gempa.dvol<-with(gempaSM,distfun(vulcanoSM))
```

Lampiran 8. *Syntax* R Pemodelan (Lanjutan)

```
# Jarak Gempa Ke Subduksi
gempa.dmega<-with(gempaSM,distfun(megathrustSM))
# Jarak Gempa Ke Sesar
gempa.dfault<-with(gempaSM,distfun(faultSM))
# STEP 2 : PEMODELAN
fit3<-kppm(gempaSM ~
gempa.dfault+gempa.dmega+gempa.dvol,"Thomas",method="clik2")
summary(fit3)
# STEP 3 : PEMODELAN TANPA GUNUNG BERAPI
fit4<-kppm(gempaSM ~
gempa.dfault+gempa.dmega,"Thomas",method="clik2")
summary(fit4)
# STEP 4 : PLOT PREDIKSI
kota<-read.csv("data3.csv")
latSM<- kota$lat*111/100
longSM<-kota$long*111/100
m<-kota$kota
kotaSM<-ppp(latSM,longSM,window=windownew,marks=m)
a<-predict.kppm(fit3,type="intensity",window=windowgempaSM)
plot(a)
plot(faultSM,add=TRUE)
plot(megathrustSM,add=TRUE)
plot(kotaSM,add=TRUE,pch=1)
with(kotaSM, text(kotaSM, labels = (kotaSM$marks), pos = 4))
# STEP 5 : PENGECEKAN KEBAIKAN MODEL DENGAN
ENVELOPE K-FUNCTION
plot(envelope(fit4,Kinhom,lamda=fit4),xlab=”r(100km)”)
# STEP 6 : PLOT CONTOUR
# CONTOUR SUBDUKSI
contour(gempa.dmega)
plot(gempaSM, add=TRUE)
plot(megathrustSM,add=TRUE,col="red",cex=2)
```

Lampiran 8. *Syntax* R Pemodelan (Lanjutan)

```
# CONTOUR SESAR
contour(gempa.dfault)
plot(gempaSM, add=TRUE)
plot(faultSM,add=TRUE,col="red",cex=2)
# CONTOUR GUNUNG BERAPI
contour(gempa.dvol)
plot(gempaSM, add=TRUE)
plot(vulcanoSM,add=TRUE,col="red",cex=2,pch=17)
```

Lampiran 9. *Output* R Uji Stasioneritas

```
> ujihomogenitas

Chi-squared test of CSR using quadrat counts
data:
X2 = 6927.3, df = 103, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: two.sided
Quadrats: 8 by 13 grid of tiles
```

Lampiran 10. *Output* R Model Lengkap

```
> summary(fit3)
FITTED MODEL:
Nonstationary Poisson process
---- Intensity: ----
Log intensity: ~gempa.dfault + gempa.dmega + gempa.d
vol
Model depends on external covariates ‘gempa.dfault’,
‘gempa.dmega’ and ‘gempa.dvol’
Covariates provided:
        gempa.dfault: distfun
        gempa.dmega: distfun
        gempa.dvol: distfun

Fitted exp(theta):
 (Intercept) gempa.dfault  gempa.dmega   gempa.dvol
 103.6247128    0.4612388    0.5358566    1.3129933
----------- CLUSTER MODEL -----------
Model: Thomas process
```

Lampiran 10. *Output* R Model Lengkap (Lanjutan)

```
Fitted cluster parameters:
    kappa     scale
1.8436574 0.1536372
Mean cluster size:  [pixel image]

Final standard error and CI
(allowing for correlation of cluster process):
                Estimate       S.E.    Ztest Zval
(Intercept)    4.6354029 0.19862683     *** 23.37
gempa.dfault -0.8700289 0.34174875      * -2.545
gempa.dmega  -0.6261566 0.06657845    *** -9.404
gempa.dvol    0.3739823 0.35362522         1.057
```

Lampiran 11. *Output* R Model Tanpa Gunung Berapi

```
> summary(fit4)
FITTED MODEL:
Nonstationary Poisson process
---- Intensity: ----
Log intensity: ~gempa.dfault + gempa.dmega + gem
pa.dvol
Covariates provided:
        gempa.dfault: distfun
        gempa.dmega: distfun
Fitted exp(theta):
 (Intercept) gempa.dfault  gempa.dmega
 108.7429251    0.5922643    0.5294679
----------- CLUSTER MODEL -----------
Model: Thomas process
Fitted cluster parameters:
    kappa     scale
1.8575568 0.1529771
Mean cluster size:  [pixel image]
Final standard error and CI
(allowing for correlation of cluster process):
                Estimate       S.E.    Ztest Zval
(Intercept)    4.6894181 0.19900575    *** 23.56
gempa.dfault -0.5235562 0.06933394    *** -7.551
gempa.dmega  -0.6361314 0.06649108    *** -9.567
```

Lampiran 12. Daftar Notasi

Notasi	Keterangan
κ	*Intensity* gempa utama
$\boldsymbol{\beta}$	Parameter yang berkaitan dengan *first order* (*intensity*)
$\boldsymbol{\theta}$	Parameter *cluster*
ρ	Fungsi *intensity*
u	Titik gempabumi
ω	Standar deviasi sebaran gempa susulan dari gempa utama

Lampiran 13 Surat Pernyataan Data

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini, mahasiswa Departemen Statistika FSAD ITS:

Nama : Rahma Metrikasari

NRP : 06211640000054

menyatakan bahwa data yang digunakan dalam Tugas Akhir/ Thesis ini merupakan data sekunder yang diambil dari penelitian / buku/ Tugas Akhir/ Thesis/ publikasi lainnya yaitu:

Sumber : BMKG

Keterangan : Data Gempabumi yang terjadi di Indonesia pada tahun 2009 - 2018

Surat Pernyataan ini dibuat dengan sebenarnya. Apabila terdapat pemalsuan data maka saya siap menerima sanksi sesuai aturan yang berlaku.

Mengetahui
Pembimbing Tugas Akhir

Dr. Achmad Choiruddin SSi, M.Sc
NIP. 199120191101

Surabaya,

Rahma Metrikasari
NRP. 06211640000054

*(coret yang tidak perlu)

BIODATA PENULIS

Rahma Metrikasari merupakan anak pertama dari pasangan Rachmad Prihandoko dan Elfi Purnamasari. Penulis lahir di Tulungagung pada tanggal 15 Juni 1998. Pendidikan formal penulis ditempuh di SD YAPIS AL – JIHAD Sorong, SMPN 1 Kauman Tulungagung, dan SMAN 1 Sooko Mojokerto. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan formal di Program Studi Sarjana Departemen Statistika ITS. Penulis diterima di ITS pada tahun 2016 melalui jalur SBMPTN. Selama perkulihan, penulis aktif dalam organisasi dan kepanitiaan. Penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Departemen Statistika ITS (HIMASTA-ITS) yaitu Departemen Sosial Masyarakat sebagai Staff pada periode 2017-2019 dan menjadi panitia Pekan Raya Statistika 2018 sub acara STATION sebagai PJ Region Mojokerto. Selain aktif dalam organisasi dan kepanitiaan, penulis juga mengikuti berbagai perlombaan baik di bidang karya tulis ilmiah maupun analisis data. Capaian prestasi penulis antara lain Finalis Lomba Karya Tulis ISCO 2018, Finalis SSO 2019, dan Finalis SPSS 2019. Apabila pembaca ingin memberikan kritik dan saran serta diskusi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini, dapat menghubungi penulis melalui email rahmametrikasari@gmail.com atau nomor telepon 082240510678.