TUGAS AKHIR - KS184822

METODE ESTIMASI DUA STEP UNTUK *INHOMOGENEOUS LOG-GAUSSIAN COX PROCESS (LGCP)*: APLIKASI PADA PEMETAAN RISIKO GEMPABUMI DI SUMATRA

KHALIMATUS SAKDIYAH
NRP 062116 4000 7002

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

METODE ESTIMASI DUA STEP UNTUK *INHOMOGENEOUS LOG-GAUSSIAN COX PROCESS* (LGCP): APLIKASI PADA PEMETAAN RISIKO GEMPABUMI DI SUMATRA

KHALIMATUS SAKDIYAH
NRP 062116 4000 7002

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

FINAL PROJECT - KS184822

TWO STEP ESTIMATION'S METHOD FOR INHOMOGENEOUS LOG-GAUSSIAN COX PROCESS (LGCP): APPLICATION IN EARTHQUAKE RISK MAPPING IN SUMATRA

KHALIMATUS SAKDIYAH
SN 062116 4000 7002

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

LEMBAR PENGESAHAN

METODE ESTIMASI DUA STEP UNTUK *INHOMOGENEOUS LOG-GAUSSIAN COX PROCESS* (LGCP): APLIKASI PADA PEMETAAN RISIKO GEMPABUMI DI SUMATRA

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

Oleh :
Khalimatus Sakdiyah
NRP. 062116 4000 7002

Disetujui oleh Pembimbing:
Dr. Achmad Choiruddin, S.Si., M.Sc. ( )
NIP. 199120191101

Mengetahui,
Kepala Departemen Statistika

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

SURABAYA, JUNI 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

METODE ESTIMASI DUA STEP UNTUK *INHOMOGENEOUS LOG-GAUSSIAN COX PROCESS* (LGCP): APLIKASI PADA PEMETAAN RISIKO GEMPABUMI DI SUMATRA

Nama Mahasiswa : Khalimatus Sakdiyah
NRP : 062116 4000 7002
Departemen : Statistika
Dosen Pembimbing : Dr. Achmad Choiruddin, S.Si., M.Sc.

Abstrak

Pulau Sumatra memiliki risiko terjadinya gempabumi yang cukup tinggi dikarenakan adanya pertumbukan antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia di sebelah barat Sumatra. Proses saling tekan kedua lempeng benua ini menyebabkan patahan, pembentukan zona subduksi serta gunung api. Berdasarkan ulasan tersebut diduga adanya pengaruh jarak sesar aktif, zona subduksi dan gunung api terhadap gempabumi yang terjadi di Pulau Sumatra dengan magnitudo ≥ 4. *Sebelum dilakukan pemodelan, maka dilakukan eksplorasi data dan memberikan hasil bahwa sebaran data gempabumi di Sumatra tidak mengikuti pola stasioner atau tidak homogen dan cenderung mengikuti cluster atau mengelompok. Hal ini memotivasi penulis untuk melakukan pemodelan intensitas gempabumi menggunakan Inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process (LGCP). Estimasi parameter pada model Inhomogeneous LGCP menggunakan Berman-Turner dan Second-Order Composite Likelihood. Hasil pemodelan mengunakan Inhomogeneous LGCP didapatkan bahwa jarak terdekat sesar aktif dan zona subduksi berpengaruh sigifikan terhadap intensitas terjadinya gempabumi dengan magnitudo* ≥ 4 *di Pulau Sumatra sedangkan jarak terdekat gunung api tidak signifikan. Model Inhomogeneous LGCP dikatakan model yang baik untuk memodelkan gempabumi di Sumatra berdasarkan envelope K-function. Pemetaan prediksi risiko hasil pemodelan yang telah didapatkan memperlihatkan bahwa lokasi di Wilayah Sumatra yang memiliki risiko gempabumi yang tinggi berada di ujung barat dan ujung timur Pulau Sumatra.*

Kata kunci : Berman-turner, Gunung Api, Second-Order Composite Likelihood, Sesar Aktif, Subduksi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

TWO STEP ESTIMATION'S METHOD FOR INHOMOGENEOUS LOG-GAUSSIAN COX PROCESS (LGCP): APPLICATION IN EARTHQUAKE RISK MAPPING IN SUMATRA

Name	**:**	**Khalimatus Sakdiyah**
Student Number	**:**	**062116 4000 7002**
Department	**:**	**Statistics**
Supervisor	**:**	**Dr. Achmad Choiruddin, S.Si., M.Sc.**

Abstract

The island of Sumatra has a high risk of earthquakes due to collision between the Indo-Australian Plate and the Eurasian Plate to the west of Sumatra. The interlocking process of these two continental plates eventually led to faults, the formation of subduction zones and volcanoes. Based on this review, it is suspected that there is an influence of active faults, subduction zones and volcanoes on earthquakes that occur on Sumatra Island with magnitude of ≥4. Prior to modeling, data exploration was carried out and the results showed that the earthquake data distribution in Sumatra did not follow stationary or inhomogeneous patterns and tended to follow clusters or groups. This motivated author to do earthquake intensity modeling using Inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process (LGCP). Parameter estimation in the Inhomogeneous LGCP model uses Berman-Turner and Second-Order Composite Likelihood. The results of modeling using the Inhomogeneous LGCP found that the closest distance of active faults and subduction zones have a significant effect on the intensity of earthquakes with magnitudes Sumatra4 on Sumatra Island while the closest distance to volcanoes is not significant. The Inhomogeneous LGCP model is said to be a good model for modeling earthquakes in Sumatra based on envelope K-function. Mapping risk prediction modeling results that have been obtained show that locations in Sumatra Region that have high risk of earthquakes are in the western and eastern ends of the island of Sumatra.

***Keywords:** Active Fault, Berman-Turners, Second-Order Composite Likelihood, Subduction, Vulcano.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul : **"Metode Estimasi Dua Step untuk *Inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process* (LGCP) : Aplikasi pada Pemetaan Risiko Gempabumi di Sumatra"**. Selama proses penyusunan Laporan Tugas Akhir ini, penulis banyak mendapat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh hormat pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu tersayang Mustofiah atas doa, nasehat, kasih sayang, dan dukungan yang selalu diberikan kepada penulis sehingga termotivasi untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini serta untuk Almarhum Ayah tercinta Samsul Huda.
2. Dr. Achmad Choiruddin, S.Si., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu, mengarahkan, membimbing dengan sabar serta memberikan saran, dukungan dan motivasi yang sangat besar bagi penulis selama mengerjakan dan menyelesaikan Tugas Akhir.
3. Dr. Drs. Agus Suharsono, M.S. dan Wibawati, S.Si., M.Si. selaku dosen penguji yang telah memberikan koreksi dan saran-saran untuk Tugas Akhir ini.
4. Dr. Kartika Fithriasari, M.Si. selaku Kepala Departemen Statistika dan Dr. Santi Wulan, S.Si., M.Si. selaku Sekretaris Departemen Bidang Akademik dan Kemahasiswaan yang telah menyediakan sarana dan prasarana serta fasilitas sehingga membantu menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Dr. Sutikno, S.Si., M.Si. selaku dosen wali selama masa studi yang telah memberikan nasehat, motivasi dan bimbingan selama ini.
6. Seluruh dosen Statistika ITS yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan serta segenap karyawan Departemen Statistika ITS.

7. Program Beasiswa Santri Berprestasi (PBSB) dari Kementerian Agama yang telah memberikan kesempatan dan membiayai penulis untuk melanjutkan studi sarjana.
8. Keluarga yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan sehingga penulis dapat mengerjakan laporan Tugas Akhir ini dengan baik.
9. Ahmad Reza Hakimi yang selalu memberikan dukungan, motivasi dan semangat untuk menyelesaikan Tugas Akhir, serta menjadi teman berbagi cerita.
10. Jemima Arista Putri selaku teman seperjuangan NRP 2 yang telah banyak membantu penulis dalam proses belajar, menemani berjuang selama masa perkuliahan serta selalu memberi dukungan dan semangat dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
11. Teman-teman tercinta satu rumah "Tautologies Assholihat" dan satu keluarga "D16 CSSMoRA ITS" yang senantiasa memberikan kebersamaan dan semangat kepada penulis selama masa perkuliahan.
12. Finola Trisnisa, Rahma Metrikasari serta Mbak Aisah S.Si selaku teman berdiskusi yang selalu memberi bantuan, semangat dan motivasi dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
13. Sahabat tercinta Prita Setya Budi Pramesti, Anggita Naftalia Ummah dan Fitri Wulandari yang selalu memberikan semangat dan selalu ada saat suka dan duka.
14. Semua pihak yang telah memberikan dukungan, semangat dan doa kepada penulis selama ini.

Semoga laporan yang penulis susun dapat bermanfaat dan dapat menerima kritik dan saran yang berguna untuk perbaikan Laporan Tugas Akhir ini. Tidak lupa penulis memohon maaf apabila terdapat banyak kekurangan dalam laporan ini.

Surabaya, Juni 2020

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman

LEMBAR PENGESAHAN.....v
ABSTRAK..... vii
ABSTRACT ix
KATA PENGANTAR xi
DAFTAR ISI..... xiii
DAFTAR GAMBAR..... xvii
DAFTAR TABEL..... xvii
DAFTAR LAMPIRAN xix
DAFTAR NOTASI..... xxi
BAB I PENDAHULUAN.....1
1.1 Latar Belakang.....1
1.2 Rumusan Masalah.....4
1.3 Tujuan.....5
1.4 Manfaat.....5
1.5 Batasan Masalah.....5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....7
2.1 *Spatial Point Pattern*.....7
2.1.1 *Poisson Process*.....7
2.1.2 *Inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process*.....8
2.2 *Properties of Spatial Point Process*.....10
2.2.1 *First Order Properties*.....10
2.2.1 *Second Order Properties*.....10
2.3 Studi Eksplorasi.....11
2.3.1 *Chi-Squared Test*.....11
2.3.2 *Ripley K-function*.....12
2.4 Estimasi Parameter.....13
2.4.1 Step 1 : *Berman-Turner*.....14
2.4.2 Step 2 : *Second-Order Composite Likelihood*.....14
2.5 Kebaikan Model.....15
2.6 Gempabumi.....15
2.7 Sesar.....16
2.8 Gunung Api.....17

Halaman

2.9 Zona Subduksi 17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 19
3.1 Sumber Data 19
3.2 Variabel Penelitian 19
3.3 Struktur Data 19
3.4 Langkah Analisis 21
3.5 Diagram Alir 22
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN 25
4.1 Karakteristik Gempabumi di Pulau Sumatra Tahun 2009-2018 25
4.1.1 Visualisasi Kejadian Gempabumi di Pulau Sumatra Tahun 2009-2018 25
4.1.2 Visualisasi Jarak Sesar dengan Kejadian Gempabumi di Pulau Sumatra 26
4.1.3 Visualisasi Jarak Subduksi dengan Kejadian Gempabumi di Pulau Sumatra 27
4.1.4 Visualisasi Jarak Gunung Api dengan Kejadian Gempabumi di Pulau Sumatra 28
4.1.5 Visualisasi Jarak Sesar, Subduksi dan Gunung Api dengan Kejadian Gempabumi di Pulau Sumatra 29
4.2 Uji Stasioneritas 29
4.3 *Ripley K-function* 30
4.4 Estimasi Parameter 31
4.5 Kebaikan Model 33
4.6 Pemetaan Hasil Pemodelan 34
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 37
5.1 Kesimpulan 37
5.2 Saran 38
DAFTAR PUSTAKA 39
LAMPIRAN 423
BIODATA PENULIS 555

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 2.1 Pola Dasar Spasial Point Pattern Reguler (Kiri), Independen/Acak (Tengah), dan Cluster (Kanan). 7
Gambar 2.2 *K-function Plot* 13
Gambar 2.3 *Plot Envelope K-function* Data Swedishpines 15
Gambar 3.1 *Pixel Image* Sesar 20
Gambar 3.2 *Pixel Image* Subduksi 20
Gambar 3.3 *Pixel Image* Gunung Api 20
Gambar 3.4. Diagram Alir 22
Gambar 3.5. Diagram Alir (Lanjutan) 23
Gambar 3.6. Diagram Alir (Lanjutan) 24
Gambar 4.1. Persebaran Gempabumi di Pulau Sumatra 26
Gambar 4.2. Jarak Sesar dengan Kejadian Gempa Bumi di Pulau Sumatra 27
Gambar 4.3. Jarak Subduksi dengan Kejadian Gempabumi di Pulau Sumatra 27
Gambar 4.4. Jarak Gunung Berapi dengan Kejadian Gempabumi di Pulau Sumatra 28
Gambar 4.5. Jarak Sesar, Subduksi, serta Gunung Api dengan Kejadian Gempabumi di Pulau Sumatra ... 29
Gambar 4.6. *K-function Plo*t untuk Mendeteksi Sebaran Data 30
Gambar 4.7. *Pair Correlation Plot* Model *Inhomogeneous LGCP* Gempabumi di Sumatra 33
Gambar 4.8. Kebaikan Model Gempabumi Sumatra Menggunakan *Envelope K-function* 34
Gambar 4.9. Pemetaan Prediksi Risiko Gempabumi 34

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 3.1 Variabel Penelitian 19
Tabel 4.1 Nilai Estimasi $\widehat{\boldsymbol{\beta}}$, $\hat{\sigma}^2$, dan $\hat{\gamma}$ 31

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

Halaman

Lampiran 1 Data Gempabumi Sumatra Magnitudo ≥ 4 Tahun 2009-2018 43
Lampiran 2 Data Sesar Aktif Sumatra 44
Lampiran 3 Data Subduksi Sumatra 44
Lampiran 4 Data Gunung Api Sumatra 45
Lampiran 5. Syntax R Input Data 46
Lampiran 6. Syntax R Karakteristik Persebaran Gempabumi 47
Lampiran 7. Syntax R Mengubah Satuan Derajat Menjadi 100 KM 48
Lampiran 8. Syntax R Intensitas Gempabumi 49
Lampiran 9. Syntax R Uji Stasioneritas 49
Lampiran 10. Syntax R Pola Persebaran Data 49
Lampiran 11. Syntax R Jarak Sesar, Subduksi, dan Gunung Api ke Gempabumi Terdekat 49
Lampiran 12. Syntax R Jarak Sesar, Subduksi, dan Gunung Api ke Gempabumi Terdekat (Lanjutan) 50
Lampiran 13. Syntax R Pemodelan 50
Lampiran 14. Output R Uji Stasioneritas 51
Lampiran 15. Output R Model Lengkap 51
Lampiran 16. Output R Model Tanpa Variabel Gunung Api 52
Lampiran 17. Surat Pernyataan Data 53

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR NOTASI

Notasi		Keterangan
$\boldsymbol{z}(u)$	:	Covariate di lokasi u
$g_{(\sigma^2,\gamma)}$	:	*Pair correlation Inhomogeneous* LGCP
σ^2	:	Varians antar *random field*
γ	:	Rentang Korelasi
r	:	Radius/jarak
$K_{inhom}(r)$	:	K-function untuk intensitas inhomogen
$K(r)$	:	K-function untuk intensitas homogen
ρ	:	Intensitas

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara astronomis Indonesia terletak di antara 6º LU - 11º LS dan 94º BT - 141º BT yang berkedudukan di Katulistiwa. Indonesia merupakan suatu wilayah yang terbentuk akibat pertemuan tiga lempeng kerak bumi aktif yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Pasifik yang bergerak secara konvergen. Hal ini menyebabkan Indonesia menjadi salah satu negara yang memiliki tingkat kegempaan yang cukup tinggi di dunia (Natawidjaja, 2012). Gempabumi dinyatakan sebagai goncangan tanah yang disebabkan oleh pelepasan energi kulit bumi secara tiba-tiba (Elnashai & Sarno, 2008). Energi ini berawal dari berbagai sumber yang berbeda, seperti pergeseran lempeng, erupsi gunung api, atau kejadian yang disebabkan oleh tangan manusia seperti ledakan atau meruntuhkan gua di bawah tanah untuk proses penambangan.

Lempeng Benua Indo-Australia relatif bergerak ke arah utara, sedangkan lempeng Pasifik dan lempeng Eurasia relatif bergerak ke arah barat (Pasau & Tanauma, 2011). Lempeng Benua Indo-Australia bergerak ke utara menumbuk Lempeng Eurasia dengan kecepatan 50–70 mm/tahun. Batas tumbukan dua lempeng ini dapat diamati berupa jalur palung laut dalam di sebelah barat Sumatra sampai ke Kepulauan Andaman. Lempeng Indo-Australia menunjam di bawah Sumatra dengan kecepatan 50 hingga 60 cm/tahun dan kemiringan dari zona penunjamannya sekitar 12° (Natawidjaja, 2004). Wilayah Sumatra bagian barat memiliki risiko yang tinggi terhadap gempabumi karena posisinya di sepanjang jalur tumbukan dua lempeng bumi.

Proses saling tekan antara lempengan Benua Eropa-Asia (Eurasia) dan lempeng Benua Indo-Australia akhirnya menyebabkan patahan yang memanjang di dasar laut yang disebut sesar Semangko. Batas antara lempeng yang menunjam dan massa batuan di atasnya disebut zona penunjaman atau zona subduksi. Temperatur bumi pada kedalaman antara 150-200 km bertambah panas sehingga bebatuan disekitar zona kontak akan meleleh dan naik ke atas membentuk

kantung-kantung magma. Pada akhirnya magma yang berada di dalam mendesak ke permukaan membentuk gunung api. Hal itu menyebabkan Sumatra mempunyai jajaran gunung api yang dikenal sebagai Pegunungan Bukit Barisan (Natawidjaja, 2007). Menurut Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Indonesia juga merupakan jalur *The Pasific Ring of Fire* (cincin api Pasifik), yang merupakan jalur rangkaian gunung api aktif di dunia. Indonesia memiliki gunung berapi dengan jumlah kurang lebih 240 buah. Akibat letak geografis inilah Indonesia menjadi negara yang memiliki potensi gempa terbesar di dunia (BMKG, 2004).

Berdasarakan informasi yang bersumber dari Kompas dan Badan Meterologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Indonesia terdapat kumpulan gempabumi dan tsunami terbesar di Indonesia dalam 20 tahun. Tiga dari delapan peristiwa tersebut terjadi di Wilayah Sumatra. Pada tahun 2004 terjadi di Provinsi Aceh lebih tepatnya barat daya Banda Aceh telah terjadi gempabumi dengan kekuatan 9,1 M yang mengakibatkan gelombang tsunami serta lebih dari 227.898 korban jiwa meninggal dunia di 14 negara. Tahun 2005, telah terjadi gempabumi yang juga mengakibatkan tsunami di Pulau Nias. Gempabumi terbesar indonesia juga terjadi di Kepulauan Mentawai pada tanggal 25 Oktober 2010 dengan kekuatan gempa 7,7 M. Pada tahun 2009 hingga 2018 tercatat telah terjadi gempabumi di wilayah Sumatra sebanyak 5.937 kali dari 47.971 gempabumi yang terjadi di seluruh Indonesia. Berdasarkan informasi dari web resmi pemerintah Provinsi Sumatera Barat, terdapat gempabumi yang terjadi pada sistem patahan Sumatra yaitu gempabumi dengan magnitudo 6,2 M pada Tahun 2013 di Aceh yang menyebabkan 22.125 orang mengungsi dan 40 orang meninggal dunia. Selain itu juga terdapat gempabumi yang melanda Kabupaten Solok dan Kota padang pada 6 Maret 2007 dengan kekuatan gempa 6,4 M dan 6.3 M.

Kejadian gempabumi terjadi tidak merata atau inhomogen sehingga ada kecenderungan yang mempengeruhi hal tersebut. Salah satu yang diduga dapat mempengaruhi kecenderungan gempabumi terjadi di suatu wilayah tertentu atau yang menyebabkan gempabumi tidak homogen (inhomogen) adalah faktor geologis dari suatu lokasi.

Gempabumi yang terjadi cenderung membentuk kluster. Pada penelitian ini menggunakan model Inhomogeneous *Log-Gausaian Cox Process* (LGCP) untuk memodelkan gempabumi yang terjadi di Sumatra. Model LGCP dapat mengakomodasi kluster yang terbentuk.

Penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan gempabumi dan *covariate* atau faktor-faktor yang diduga memiliki pengaruh spasial terhadap gempabumi di wilayah Sumatra dilakukan oleh Khairul Amri dalam tugas akhirnya berjudul "Wilayah risiko bencana gempabumi pada jalur patahan semangko di Kabupaten Tanah Datar Provinsi Sumatra Barat". Hasil analisis dalam penelitian tersebut yakni wilayah yang memiliki risiko bencana gempabumi yang tinggi berada di sekitar jalur patahan/sesar semangko (Amri, K., 2004). Penelitian gempabumi di Sumatra juga telah dilakukan oleh Rahma Metrikasari yang berjudul "Pemodelan Risiko Gempabumi di Pulau Sumatra Menggunakan Model *Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process*" dengan hasil bahwa semakin dekat jarak sesar dan subduksi ke suatu lokasi, maka risiko terjadinya gempabumi di lokasi tersebut meningkat (Metrikasari & Choiruddin, 2020). Penelitian terhadap *covariate* yang diduga memiliki pengaruh spasial terhadap gempabumi dilakukan oleh Marianna Siino et al pada tahun 2017 menggunakan data *Hellenic seismicity* tahun 2005 hingga 2014. Pada penelitian ini gempabumi yang diamati adalah gempabumi yang memiliki magnitudo lebih dari atau sama dengan 4 dan menggunakan informasi jarak gempabumi terhadap zona subduksi, jarak gempabumi terhadap gunung api dan jarak gempabumi terhadap sesar aktif. Hasil analisis dalam penelitian tersebut adalah terdapat pengaruh spasial yang signifikan antara jarak gempabumi terhadap zona subduksi dan patahan terdekat. Namun jarak gempabumi tehadap gunung berapi terdekat tidak signifikan (Siino, M., et al, 2017). Selain itu, penelitian juga dilakukan oleh Finola Trisnisa *et al* pada tahun 2019 mengenai gempabumi di Pulau Jawa dengan mempertimbangkan jarak sesar dan gunung api dengan hasil bahwa kedua jarak tersebut berpengaruh signifikan terhadap risiko gempabumi di Pulau Jawa (Trisnisa, F., et al, 2019).

Penelitian terkait model *Log-Gaussian Cox Process* pernah digunakan untuk data gempabumi oleh Marianna Siino et al pada tahun 2018. Pada tahun 2020, model *Inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process* diaplikasikan untuk data gempabumi di Pulau Sulawesi dan Maluku dengan mempertimbangkan faktor geologis di wilayah tersebut yaitu gunung api, sesar aktif dan zona subduksi oleh Choiruddin et al (Choiruddin, et al. 2020b). Penelitian *Modern Statistics for Spatial Point Process* menyatakan bahwa *Cox Process* merupakan salah satu pengembangan dari *Poisson process* yang didorong oleh adanya heterogenitas spasial dan *Log-Gaussian Cox Process* merupakan suatu model yang fleksibel untuk data *cluster*, mudah di interpretasi model dan menggunakan metode yang sederhana dalam estimasi parameter (Møller & Waagepetersen, 2004).

Berdasarkan dari uraian yang telah disampaikan dan beberapa penelitian sebelumnya, akan dilakukan pemodelan gempabumi di wilayah Sumatra dengan mempertimbangkan jarak terdekat gempa bumi terhadap masing-masing *covariate* yang paling dekat dengan menggunakan *Inhmogenous Log-Gaussian Cox Process*. *Covariate* yang digunakan dalam penelitian ini adalah gunung berapi, zona subduksi dan sesar aktif. Magnitudo gempabumi yang diteliti lebih dari sama dengan 4 berdasarkan paper Marianna Siniio et al. Setelah didapatkan model untuk prediksi gempabumi maka dilanjutkan dengan membuat pemetaan risiko berdasarkan hasil pemodelan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana karakteristik persebaran kejadian gempabumi di Sumatra tahun 2009-2018?
2. Bagaimana pemodelan risiko gempabumi di Sumatra dengan mempertimbangkan lokasi gunung berapi, zona subduksi dan sesar aktif dengan menggunakan model spasial *inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process* ?
3. Bagaimana pemetaan risiko gempabumi di Sumatra berdasarkan hasil pemodelan ?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui karakteristik persebaran kejadian gempabumi di Sumatra tahun 2009-2018.
2. Mengetahui pemodelan risiko gempabumi di Sumatra dengan mempertimbangkan lokasi gunung berapi, zona subduksi dan sesar aktif dengan menggunakn model spasial *inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process*.
3. Mengetahui pemetaan risiko gempabumi di Sumatra berdasarkan hasil pemodelan.

1.4 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat untuk berbagai pihak. Penelitian ini menghasilkan model yang dapat digunakan untuk mengetahui lokasi terjadinya gempabumi serta dapat divisualisaikan melalui peta risiko terjadi gempabumi di wilayah Sumatra. Peta risiko tersebut dapat dijadikan sebagai pertimbangan dalam upaya peringatan dini atau penanggulangan gempabumi khususnya di wilayah Sumatra. Bagi masyarakat umum terutama masyarakat yang tinggal di wilayah Sumatra dapat mengetahui lokasi-lokasi yang memiliki risiko lebih akan terjadinya gempabumi berdasarkan pemetaan hasil pemodelan. Selain itu, juga diharapkan mampu memberikan wawasan keilmuan statistika mengenai model spasial *inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process*.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Data yang digunakan adalah data gempabumi yang terjadi di wilayah Sumatra pada tahun 2009-2018 dengan magnitudo lebih besar sama dengan 4.
2. *Covariate* yang digunakan adalah jarak terdekat titik gempabumi dengan sesar aktif, jarak terdekat titik gempabumi dengan subduksi, dan jarak terdekat titik gempabumi dengan gunung berapi.

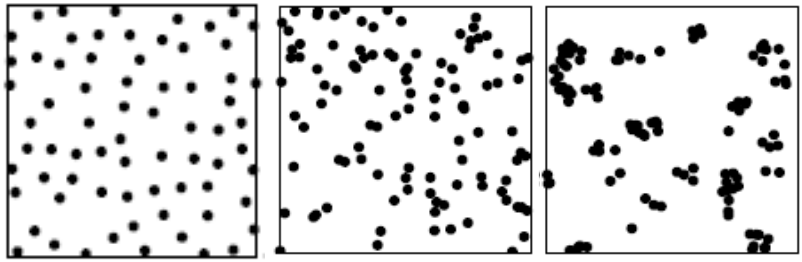
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

Pada bagian ini diuraikan tinjauan pustaka terkait dengan metode yang digunakan untuk pemodelan gempabumi di Sumatra, yaitu sebagai berikut.

2.1 *Spatial Point Pattern*

Spatial point process adalah himpunan titik-titik acak pada wilayah $B \subset S$ dengan memiliki indeks s sebagai keterangan lokasi. Realsisasi dari *spatial point process* adalah *spatial point pattern* (Møller & Waagepetersen, 2004). Terdapat 3 pola dasar dalam *spasial point pattern* yaitu pola reguler, independen dan *cluster*/kelompok. Visualisasi pola dasar dalam *spasial point pattern* pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Pola Dasar *Spasial Point Pattern* Reguler (Kiri), Independen/Acak (Tengah), dan Cluster (Kanan).

Pola reguler yaitu dimana titik-titik cenderung saling menjauh satu sama lain atau menyebar. Pola independen yaitu dimana titik-titik cenderung menunjukkan pola yang acak atau ramdom dan pola *cluster* yaitu dimana titik-titik cenderung saling mendekat atau mengelompok (Baddely et al., 2015).

2.1.1 *Poisson Process*

Model *spatial point process* ditentukan oleh deterministik atau fungsi intensitas acak dengan analogi model linear umum dan model efek acak. Terdapat dua model, yaitu proses *Poisson* dan *Cox/Cluster*.

Poisson process $\boldsymbol{X}$ didefinisikan pada S dengan intensitas μ dan fungsi intensitas ρ untuk setiap wilayah $B \subseteq S$ dengan $\mu(B) > 0$ dan jika memenuhi kondisi berikut.

1. Setiap $B \subseteq S$ dengan $0 \leq \mu(B) < \infty$, maka $N(B) \sim Poisson(\mu(B))$
2. Bergantung pada $N(B)$, poin dalam $\mathbf{X} \cap B$ adalah i.i.d dengan *joint density proportional* $\rho(u), u \in B$ (Møller & Waagepetersen, 2004).

Jika $\rho(u)$ konstan pada semua wilayah $u \epsilon S$ maka dikatakan *Poisson process* yang homogen. *Poisson process* adalah model untuk *spatial point pattern* yang memiliki pola tidak ada interaksi atau acak (*complete spatial randomness),* karena $\boldsymbol{X}_A$ dan $\boldsymbol{X}_B$ bersifat independen sehingga kapanpun *A*, $B \subset S$ terpisah. Maka

$$\rho^{(n)}(u_1, u_2, ..., u_n) = \rho(u_1).....\rho(u_n), g = 1. \qquad (2.1)$$

mencerminkan kurang adanya interaksi. Stasioner berarti bahwa $\rho(u)$ konstan, dan menyiratkan isotropi dari $\boldsymbol{X}$ (Møller & Waagepetersen, 2004). Secara khusus *Poisson point process* $\rho^2(u, v) = \rho(u)\rho(v)$ dan $g(u, v) = 1$ (Choiruddin et al., 2018).

2.1.2 *Inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process*

Cox Process merupakan perkembangan dari *Poisson process* yang diperoleh dengan mempertimbangkan fungsi intensitas *Poisson point process* sebagai realisasi dari *random field* (Choiruddin et al., 2018). *Cox point process* adalah *Poisson process* dengan fungsi intensitas yang random (Baddely et al., 2015). Sebuah proses stokastik non-negatif $\boldsymbol{\Lambda}$ yang mengikuti proses *Poisson* dan $\mathbf{X}|\boldsymbol{\Lambda}$ adalah *Poisson point process* pada B dengan fungsi intensitas $\boldsymbol{\Lambda}$**,** maka $\mathbf{X}$ dikatakan sebagai *Cox Process* yang digerakkan $\boldsymbol{\Lambda}$**.** Jika dibangun sebuah model $G(u) = \log \boldsymbol{\Lambda}(u)$,dan setiap lokasi dilambangkan $u_1, u_2, ...u_n, u \in S$, maka *G(u)* adalah *Gaussian random field*. *Gaussian random* field memiliki domain $(-\infty, \infty)$ sehingga harus di log kan agar dapat memperoleh model intensitas dari *point process*. Sehingga didapatkan persamaan berikut .

$$\mathbf{\Lambda}(u) = \exp(G(u)) \tag{2.2}$$

Dengan fungsi rata-rata dan kovarians dari *G(u)* berturut-turut pada persamaan 2.3 dan persamaan 2.4 berikut.

$$\mu(u) = EG(u) \tag{2.3}$$

$$C(u,v) = \operatorname{cov}(G(u), G(v)) = E[G(u)G(v)] - \mu(u)\mu(v) \tag{2.4}$$

Jika $\mathbf{X}|\mathbf{\Lambda}$ dimana $\mathbf{X}$ mengikuti proses *Poisson* dengan fungsi intensitas Λ dan log Λ mengikuti proses Gaussian maka $\mathbf{X}$ disebut *Log-Gaussian Cox Process* (Møller & Waagepetersen, 2004). Fungsi intensitas random $\mathbf{\Lambda}$ dapat mewakili faktor lingkungan acak yang dapat mengakibatkan gempabumi. Pada penelitian ini log $\mathbf{\Lambda}$ dapat ditulis pada persamaan 2.5.

$$\log \mathbf{\Lambda}(u) = \zeta + \mathbf{z}(u)^T \boldsymbol{\beta} + \phi(u), \tag{2.5}$$

dengan ζ merupakan *intercept*, $\boldsymbol{z}(u)$ adalah mewakili faktor geologis di lokasi *u* dan ϕ adalah *zero-mean stationary Gaussian random field* dengan fungsi kovarians $c(u,v,\boldsymbol{\theta}) = \sigma^2 \exp(-\|u-v\| / \gamma)$ dimana $\boldsymbol{\theta} = (\sigma^2, \gamma)^T$, maka fungsi intensitas *Log-Gaussian Cox Process* (LGCP) pada persamaan 2.6.

$$\rho(u;\boldsymbol{\beta}) = \exp(\zeta + \mathbf{z}(u)^T \boldsymbol{\beta} + \sigma^2/2) = \exp(\beta_0 + \mathbf{z}(u)^T \boldsymbol{\beta}) \tag{2.6}$$

Pair corelation atau $g(r)$ melihat kontribusi dari jarak antar titik yang sama dengan r. Adapun rumus *Pair Correlation* dari *Log-Gaussian Cox Process* pada persamaan 2.7.

$$g_{(\sigma^2,\gamma)} = \exp(\sigma^2 \exp(-r/\gamma)), \tag{2.7}$$

Keterangan :

$g_{(\sigma^2,\gamma)}$: *Pair correlation* LGCP

σ^2 : varians intensitas

γ : *scale parameter*

r : batas *window*

Intensitas dan *pair correlation* merupakan fungsi dari model *Log-Gaussian Cox Process* (LGCP). *K-function* untuk *Log-Gaussian Cox Process* sebagi berikut.

$$K_{(\sigma^2,\gamma)}(r) = \int_0^r 2\pi s \exp(\sigma^2 \exp(-s/\gamma))ds\,. \qquad (2.8)$$

Keterangan :

$K_{(\sigma^2,\gamma)}(r)$: *K-function* LGCP

s : bernilai 0 hingga r, dimana $r \in R^+$

2.2 *Properties of Spatial Point Process*

Spatial point process memiliki *properties* yaitu *first order properties* dan *second order properties. First order properties* dideskripsikan oleh intensitas *(intensity)* sedangkan *second order properties* dideskripsikan oleh *pair correlation function.*

2.2.1 First Order Properties

Intensitas merupakan *first order order properties* dari *spatial point process.* Suatu proses titik X memiliki intensitas di setiap sub-wilayah B dari ruang dua dimensi. Jumlah titik X yang diharapkan dalam B sebanding dengan area B.

$$\lambda(B) = EN(B)\,, \qquad (2.9)$$

Fungsi *non-negative intensity* pada *spatial point pattern* sebagai berikut.

$$\lambda(B) = \int_B \rho(u;\boldsymbol{\beta})du\,, \qquad (2.10)$$

dimana $\rho(u;\boldsymbol{\beta})$ adalah peluang mengobservasi satu titik di sebuah wilayah yang sangat kecil dan berpusat di *u* (Møller & Waagepetersen, 2004).

2.2.1 *Second Order Properties*

Second Order Properties pada *point pattern* adalah p*air correlation function. Pair correlation function* dapat digunakan untuk menentukan apakah *point pattern* acak, reguler atau *cluster. Pair correlation function* atau *g(r)* hanya melihat kontribusi dari jarak antar titik yang sama dengan *r* dengan rumus untuk dua dimensi sebagai berikut (Baddely et al., 2015).

$$g(u,v,\boldsymbol{\theta}) = \frac{\rho^2(u,v,\boldsymbol{\theta})}{\rho(u)\rho(v)}, \qquad (2.11)$$

Jika nilai $g(u,v,\boldsymbol{\theta}) > 1$ berarti jarak antar *point pattern* saling berdekatan dan cenderung berkelompok/*cluster*, sedangkan jika $g(u,v,\boldsymbol{\theta}) < 1$ berarti jarak antar *point pattern* saling berjauhan atau reguler dan jika $g(u,v,\boldsymbol{\theta}) = 1$ berarti tidak terdapat keterkaitan antara lokasi *u* dengan lokasi *v* atau acak (Møller & Waagepetersen, 2004).

2.3 *Studi Eksplorasi*

Studi eksplorasi dilakukan untuk mengetahui apakah data mengikuti pola yang stasioner menggunakan uji *chi-squared.* Selain itu, untuk mengetahui korelasi spasial dari data dengan menggunakan *K-function*.

2.3.1 Chi-Squared Test

Pengujian stasioneritas data spasial yang digunakan untuk mengetahui data yang digunakan mengikuti pola yang stasioner atau tidak. Pengujian stasioneritas data spasial dapat menggunakan uji *chi-squared* dengan hipotesis sebagai berikut (Baddely et al., 2015). Hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini yaitu

H_0: Data mengikuti pola stasioner

H_1: Data tidak mengikuti pola stasioner

Statistik uji yang digunakan pada persamaan 2.12 berikut.

$$X^2_{hit} = \sum_{j=1}^{m} \frac{(observed - \exp ected)^2}{\exp ected} = \sum_{j=1}^{m} \frac{\left(n_j - \frac{n}{m}\right)^2}{\left(\frac{n}{m}\right)}. \qquad (2.12)$$

Keterangan :

n_j : banyaknya *point* di kotak bagian ke-j

n : jumlah seluruh *point*

m : jumlah seluruh kotak bagian

Jika ditetapkan tingkat signifikansi α sebesar 0,05, maka H_0 ditolak jika nilai *P-value* kurang dari α atau $X^2_{hitung} > X^2_{(\alpha,df)}$ dengan df = *m*-1, sehingga dapat disimpulkan bahwa data tidak mengikuti pola stasioner.

2.3.2 Ripley K-function

Korelasi spasial digunakan untuk menentukan klasifikasi *spasial point pattern* apakah reguler (poin cenderung menghindari satu sama lain), indenpenden (keacakan spasial lengkap), dan *clustering* (cenderung berdekatan atau berkelompok). *K-function* merupakan cara menganalisis korelasi spasial dalam *point pattern* yang di populerkan oleh *Ripley* (Ripley, 1977). *K-function* didapat berdasarkan jarak antar titik *g* yang kurang dari sama dengan *r*. Jika intensitas homogen maka rumus dari *K-function* pada persamaan 2.13 berikut.

$$K(r) = \frac{|B|}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \mathbf{I}\left\{d_{ij} \le r\right\} e(u_i, u_j; r), \qquad (2.13)$$

Keterangan :

d_{ij} : Jarak antar poin berpasangan $\|u_i - u_j\|$

$e(u_i, u_j; r)$: bobot *edge correction*

dimana I akan bernilai 0 jika d_{ij} berada di luar batas tepi r dan I akan bernilai 1 jika d_{ij} berada pada batas tepi r. Apabila intensitas *inhomogen*, maka rumus *inhomogeneous K-function* sebagai berikut.

$$Kinhom(r) = \frac{1}{|B|} \sum_{i} \sum_{j \ne 1} \frac{1\left\{\|u_i - u_j\| \le r\right\}}{\rho(u_i)\rho(u_j)} e(u_i, u_j; r) \qquad (2.14)$$

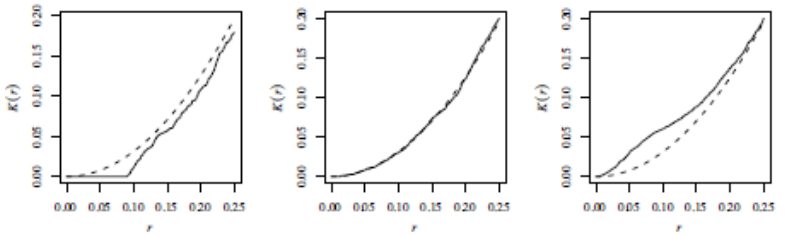
Keterangan :

$|B|$: luas dari *observation window*

$\hat{\rho}(u_i)$: nilai estimasi dari $\rho(u_i)$

$\hat{\rho}(u_j)$: nilai estimasi dari $\hat{\rho}(u_j)$

K-function dapat diilustrasikan pada Gambar 2.2 berikut.



a b c

Gambar 2.2 *K-function Plot*

Keterangan :

K-function empiris ($\widehat{K}(r)$) : garis padat

K-function poisson process $K_{pois}(r)$: garis putus-putus

Gambar 2.2 merupakan ilustrasi antara *K-function* empiris ($\widehat{K}(r)$) dengan *K-function* teoritis *poisson process* $K_{pois}(r)$, dimana untuk menentukan plot sebaran data menggunakan perbandingan antara $\widehat{K}(r)$ dengan $K_{pois}(r)$. $K_{pois}(r)$ digunakan sebagai pembanding dikarenakan pada $K_{pois}(r)$ menggambarkan pola persebaran yang independen. Gambar 2.2(a) terdapat kurva yang menunjukkan bahwa *K-function* empiris lebih rendah daripada *K-function* teoritis *poisson process* ($\widehat{K}(r)$) < $K_{pois}(r)$ yang berarti bahwa sebaran data cenderung saling menjauh atau reguler. Jika ($\widehat{K}(r)$) = $K_{pois}(r)$ seperti pada Gambar 2.2(b) maka sebaran data cenderung acak atau independen. Gambar 2.2(c) merupakan kebalikan dari kurva pada 2.2(a) yang berarti bahwa jika ($\widehat{K}(r)$)>$K_{pois}(r)$ maka sebaran data cenderung membentuk kelompok-kelompok atau mengklaster (Baddely et al., 2015).

2.4 *Estimasi Parameter*

Pada penelitian ini, estimasi parameter dilakukan dalam dua *step* atau dua langkah. Langkah pertama menggunakan metode *Berman-Turner approximation* untuk mengestimasi parameter **β.** Langkah yang kedua menggunakan metode *second order composite likelihood* untuk mengestimasi parameter σ^2 dan γ.

2.4.1 Step 1 : Berman-Turner

Berman dan Turner mengembangkan fungsi *likelihood* dari *inhomogeneous Poisson point process* untuk mendekati fungsi *likelihood* dari *Generalized Linier Model Poisson*. *Inhomogeneous Poisson point process* memiliki parameter **β**, maka fungsi *likelihood* untuk mengestimasi **β** sebagai berikut (Baddely et al., 2015).

$$L(\boldsymbol{\beta};u) = \rho(\boldsymbol{\beta};u_1)\rho(\boldsymbol{\beta};u_2).....\rho(\boldsymbol{\beta};u_n)\exp(\int_B (1-\rho(u;\boldsymbol{\beta})du)) \quad , \quad (2.15)$$

Bentuk *log-likelihood* persamaan 2.16 sebagai berikut.

$$\log L(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^{n} \log \rho(\boldsymbol{\beta};u_i) - \int_B \rho(u;\boldsymbol{\beta})du \, , \quad (2.16)$$

Berman dan Turner menggunakan metode kuadratur numerik, sehingga $\int_B \rho(u;\boldsymbol{\beta})du$ dapat didekati dengan $\sum_{i=1}^{n+d} \rho(u_i;\boldsymbol{\beta})w_i$ dimana d adalah banyaknya *dummy point.* Sehingga didapatkan persamaan berikut.

$$\log L(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^{n+d} \left(I_i \log \rho(u_i;\boldsymbol{\beta}) - \rho(u_i;\boldsymbol{\beta})w_i \right), \quad (2.17)$$

dimana nilai $I_i = 1$ jika u_i adalah data poin dan $I_i = 0$ jika u_i adalah *dummy point.*

2.4.2 Step 2 : Second-Order Composite Likelihood

Metode estimasi parameter yang digunakan untuk mendapatkan nilai estimator parameter *cluster* $\boldsymbol{\theta} = (\sigma^2;\gamma)^T$ yaitu metode *second orders composite likelihood* yang berdasarkan intensitas momen kedua $\rho^{(2)}(u_i,u_j;\boldsymbol{\theta})$ dengan persamaan berikut.

$$\log CL(\boldsymbol{\theta}) = \sum_i \sum_{j\neq 1} a(u_i,u_j)\left[\log \rho^2(u_i,u_j;\boldsymbol{\theta}) - \log \int_B \int_B a(u_i,u_j)\rho^2(u_i,u_j;\boldsymbol{\theta})du_i du_j \right], \quad (2.18)$$

Keterangan :

θ **:** parameter yang di estimasi (σ^2 dan γ)

a : fungsi pembobot

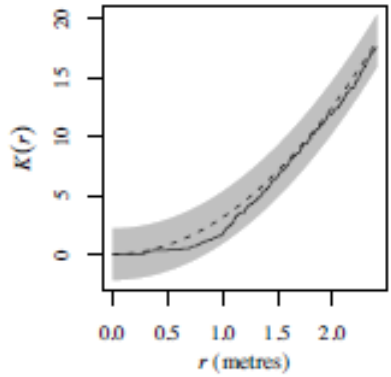
Persamaan 2.19 diturunkan terhadap $\boldsymbol{\theta}$ sehingga menghasilkan persamaan 2.20 sebagai berikut.

$$\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\theta}} \log CL(\boldsymbol{\theta}) = \sum_i \sum_{j \neq 1} a(u_i, u_j) \frac{K_2(u_i, u_j; \boldsymbol{\theta})}{\rho^2(u_i, u_j; \boldsymbol{\theta})} - \sum_i \sum_{j \neq 1} a(u_i, u_j) \frac{(K_2, a)}{(\rho^2, a)}, \quad (2.19)$$

$$K_2(u_i, u_j; \boldsymbol{\theta}) = \frac{\partial}{\partial \theta} \rho^2(u_i, u_j; \boldsymbol{\theta}) \quad (2.20)$$

2.5 *Kebaikan Model*

Pada penelitian ini untuk mengetahui kebaikan model menggunakan *envelope*. *Envelope* membandingkan hasil dari simulasi model *inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process* dengan plot *K-function* data. Apabila *K-function* data berada pada *envelope K-function* maka model dapat dikatakan baik. Pada Gambar 2.3 merupakan contoh visualisasi *plot envelope K-function* dari data *Swedishpines* dimana area abu-abu merupakan area interval *envelope* (Baddeley et al., 2015).



Gambar 2.3 Plot *Envelope K-function* Data Swedishpines

2.6 Gempabumi

Gempabumi (*earthquake*) adalah peristiwa bergetar atau bergoncangnya bumi karena pergerakan/pergeseran lapisan batuan pada kulit bumi secara tiba-tiba akibat pergerakan lempeng-lempeng

tektonik. Gempabumi dapat terjadi kapan dan di mana saja. Meskipun demikian, konsentrasi gempabumi cenderung terjadi di tempat-tempat tertentu saja di lapisan kulit bumi. Lapisan kulit bumi terluar atau litosfer terdiri atas lempeng-lempeng tektonik yang kaku dan terapung di atas batuan yang relatif tidak kaku serta bergerak satu sama lain. Gempabumi tidak dapat terjadi di sembarang tempat, tetapi umumnya gempabumi terjadi di sekitar batas lempeng, yang membentuk jalur gempabumi dunia, dan sekitar sesar (Sunarjo et al., 2012).

Berdasarkan penyebabnya gempabumi dapat dibedakan menjadi gempabumi tektonik, vukanik, runtuhan, dan buatan manusia. Gempabumi tektonik adalah gempabumi yang disebabkan oleh pelepasan energi elastis yang tersimpan dalam lempeng tektonik. Gempabumi vulkanik adalah gempabumi yang disebabkan oleh kegiatan gunung berapi. Gempabumi runtuhan adalah gempabumi lokal yang terjadi apabila suatu gua atau lokasi pertambangan runtuh, namu dapat juga terjadi karena kejatuhan meteor atau benda langit. Gempabumi buatan manusia adalah gempabumi yang disebabkan oleh aktivitas manusia seperti peledakan dinamit, nuklir, peledakan bom dan lain-lain.

2.7 Sesar

Sesar merupakan rekahan yang mengalami geser-geseran yang jelas. Pergeseran tersebut berkisar dari beberapa milimeter sampai ratusan meter sedangkan panjangnya mulai dari beberapa desimeter sampai hingga ribuan meter. Sesar dapat terjadi pada segala macam batuan dengan tipe yang beragam. Sesar pada struktur batuan dapat mengakibatkan perubahan maupun perkembangan topografi, mengubah aliran air dibawah dan diatas permukaan serta merusak stratigrafi batuan dan sebagainya. Bila batuan yang menumpu merosot ke bawah akibat batuan penumpu di kedua sisinya bergerak saling menjauh, sesarnya dinamakan sesar normal (normal). Bila batuan yang menumpu terangkat ke atas akibat batuan penumpu di kedua sisinya bergerak saling mendorong, sesarnya dinamakan sesar naik (*reverse/thrust*). Bila kedua batuan pada sesar bergerak saling menggelangsar, sesarnya dinamakan sesar geseran jurus (*strike slip*) (Sunarjo et al., 2012).

2.8 Gunung Api

Gunung berapi merupakan bentuk yang dihasilkan oleh magma yang muncul ke permukaan bumi. Gunung api hanya terdapat pada tempat-tempat tertentu, yaitu pada jalur punggungan tengah samudera, pada jalur pertemuan dua buah lempeng kerak bumi, dan pada titik-titik panas di muka bumi tempat keluarnya magma, di benua maupun di samudera (*hot spot*). Sebagian besar gunung api yang aktif di dunia berada di pertemuan lempeng tektonik dan muncul di daerah-daerah yang berada di dalam di Lautan Pasifik yang disebut "cincin gunung api" *(ring of fire)* (Bronto, 1996).

2.9 Zona Subduksi

Zona Subduksi merupakan daerah zona seismik aktif, sebagian besar gempabumi terjadi di daerah ini, baik gempabumi dangkal, menengah maupun dalam sebagai hasil dari penunjaman lithosfer. Terjadinya zona subduksi dimulai dengan dua lempeng (benua dan samudera) yang bergerak mendekat antara satu dengan yang lainnya. Kemudian terjadi konvergen, plat samudera melengkung dan terdorong ke bawah plat benua yang lebih tebal dan lebih stabil (Malik, 2009).

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Sumber Data

Sumber data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder yang diambil dari laman website Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Indonesia www.bmkg.go.id untuk data koordinat gempabumi, laman website Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) unuk data koordinat lokasi gunung api, serta peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017 untuk data koordinat lokasi sesar aktif dan subduksi. *Observation Window* pada penelitian ini adalah $B = [104.51773,\ 119.2955]\ x\ [-6.518365,\ 7.378783]$ 100 km.

3.2 Variabel Penelitian

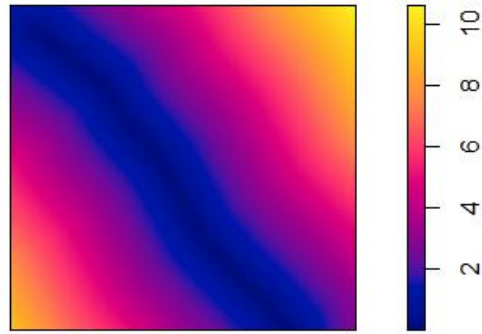
Variabel penelitian yang digunakan dalam penelitian ini dijelaskan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variabel Penelitian

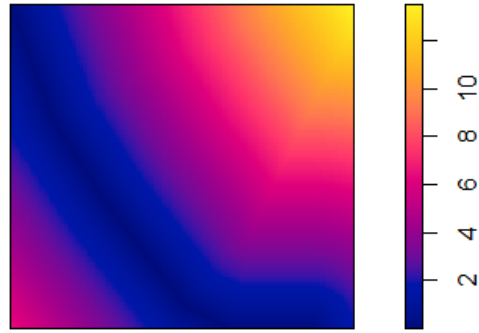
Variabel	Keterangan
Y	Koordinat lintang (*latitude)* dan bujur (*longitude)* tempat terjadinya gempabumi di Sumatra
X_1	Koordinat lintang (*latitude)* dan bujur (*longitude)* lokasi sesar aktif di Sumatra
X_2	Koordinat lintang (*latitude)* dan bujur (*longitude)* lokasi subduksi di Sumatra
X_3	Koordinat lintang (*latitude)* dan bujur (*longitude)* lokasi gunung api di Sumatra

3.3 Struktur Data

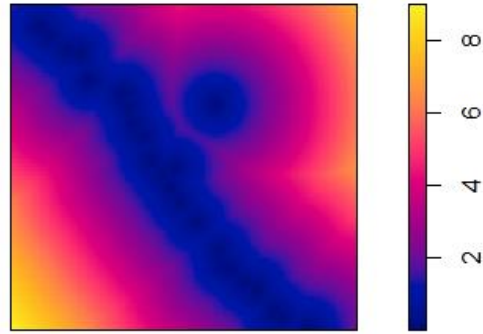
Struktur data yang digunakan dalam penelitian dapat digambarkan dalam bentuk *pixel image* pada Gambar 3.1-3.3.



Gambar 3.1 Pixel Image Sesar



Gambar 3.2 Pixel Image Subduksi



Gambar 3.3 Pixel Image Gunung Api

Struktur data dapat digambarkan melalui *pixel image* dengan penjelasan bahwa semakin cerah warna maka semakin jauh jarak dalam 100 kilometer (km) antara gempabumi yang terjadi dengan *covariate* atau prediktor yang digunakan dalam penelitian ini. Gambar 3.3 merupakan *pixel image* dari gunung api yang memvisualisaikan jarak antar gunung api dengan gempabumi terdekat. Titik-titik berwarna hitam merupakan letak gunung api, jika pada *pixel image* menunjukkan warna kuning atau semakin cerah, maka terdapat jarak antara gempabumi dengan gunung api terdekat sejauh 800 km atau lebih. Sebaliknya, apabila pada *pixel image* Gambar 3.3 yang mengunjukkan warna gelap maka jarak antara gempabumi dengan gunung api terdekat semakin pendek atau dekat. Penjelasan ini juga berlaku pada *pixel image* sesar pada Gambar 3.1 dan *pixel image* subduksi pada Gambar 3.2.

3.4 Langkah Analisis

Adapun langkah-langkah penelitian yang dilakukan pada penelitian ini yaitu sebagai berikut.

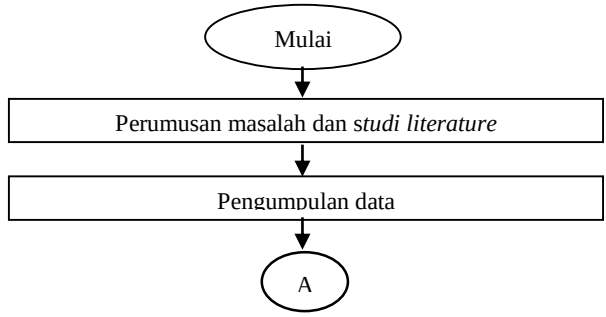
1. Merumuskan masalah dan *studi literature*
2. Mengumpulkan data
3. Menentukan batas *observation window* wilayah Sumatra
4. Menghitung dan menentukan jarak terdekat gempabumi dengan masing-masing gunung api, sesar, dan subduksi dengan menggunakan jarak *Euclidean* dengan rumus, jarak terdekat = $\sqrt{(Long_1 - Long_2)^2 - (Lat_1 - Lat_2)^2}$, sehingga notasi pada masing-masing *covariate* menjadi $Z(u)$
5. Melakukan visualisai pada data gempabumi, gunung api, sesar, dan subduksi dengan menggunakan *package spatstat* melalui *Software R*
6. Melakukan uji stasioneritas pada data menggunakan *chi-squared test*
7. Melakukan identifikasi korelasi spasial
   a. Jika hasil poin 6 adalah data memiliki pola yang stasioner maka identifikasi korelasi spasial menggunakan *K-function.*

b. jika hasil poin 6 adalah data memiliki pola yang tidak stasioner maka identifikasi korelasi spasial menggunakan *inhomogeneous K-function* dengan *package kinhom Software R*

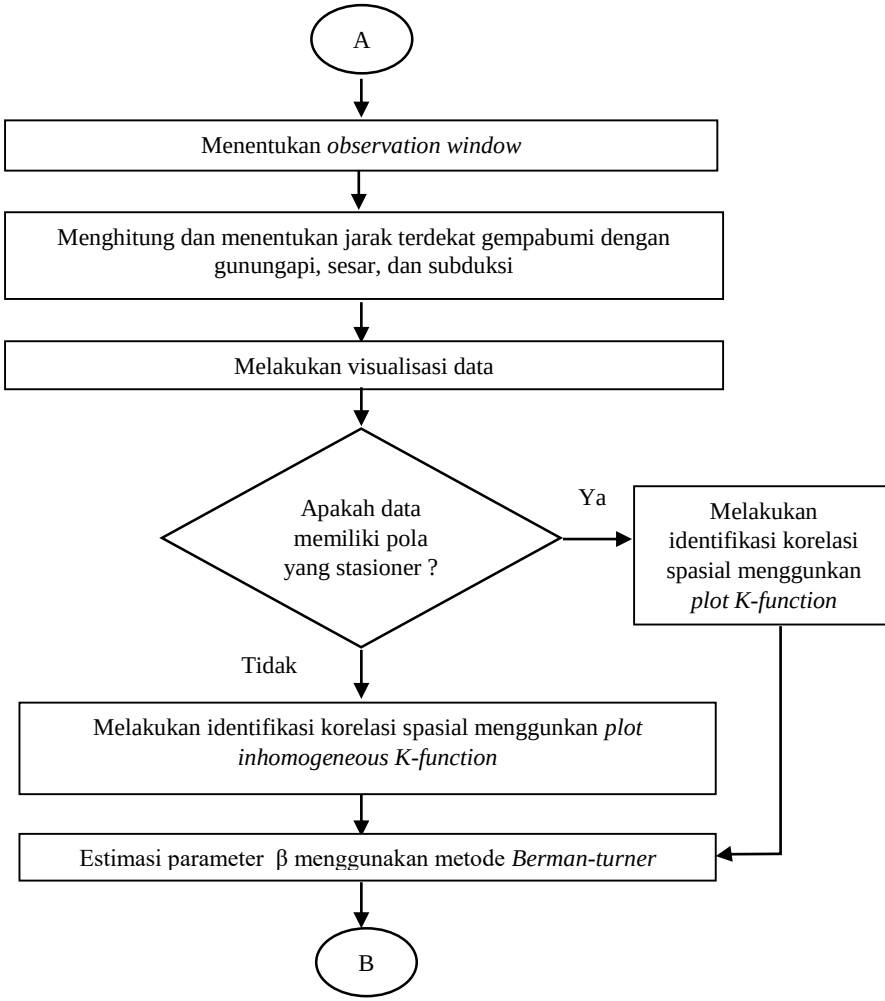
8. Estimasi parameter untuk memprediksi gempabumi dengan memperhitungkan jarak terjadinya gempabumi dengan lokasi, sesar, gunung berapi dan subduksi di Sumatra
   a. Estimasi parameter **β** menggunakan *Berman-turner*
   b. Estimasi paeameter σ^2 dan γ menggunakan *second order composite likelihood*
9. Mendapatkan model untuk memprediksi terjadinya gempabumi di Sumatra
10. Mendapatkan kebaikan model menggunakan *envelope K-function*
11. Melakukan pemetaan risiko berdasarkhan hasil pemodelan terjadinya gempabumi di Sumatra
12. Menarik kesimpulan dan saran.

3.5 Diagram Alir

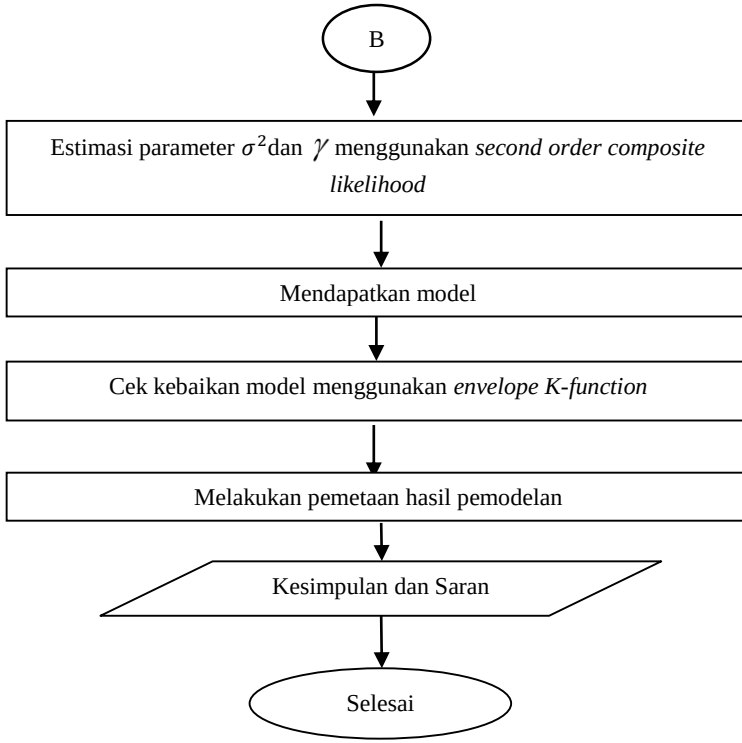
Diagram alir menggambarkan alur perjalanan pembuatan laporan ini, mulai dari proses perumusan masalah dan *studi literature*, pengumpulan data hingga penarikan kesimpulan dan saran. Diagram alir dari langkah analisis pada penelitian ini adalah sebagai berikut.



Gambar 3.4. Diagram Alir



Gambar 3.5. Diagram Alir (Lanjutan)



Gambar 3.6. Diagram Alir (Lanjutan)

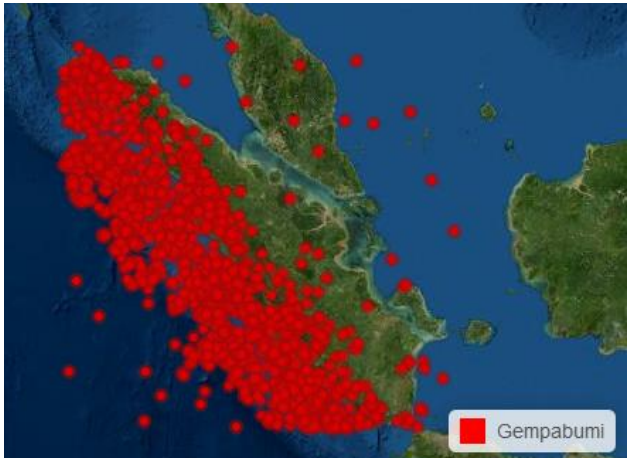
BAB IV
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Gempabumi di Pulau Sumatra Tahun 2009-2018

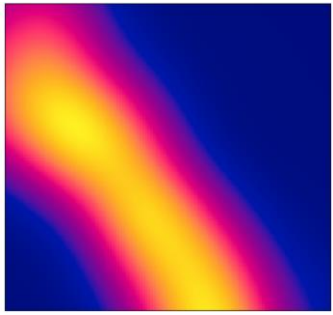
Karakteristik dari gempabumi yang disajikan berupa visualisasi persebaran kejadian gempabumi di Pulau Sumatra, visualisasi jarak sesar, gunung berapi, dan zona subduksi dengan kejadian gempabumi di Pulau Sumatra tahun 2009-2018.

4.1.1 Visualisasi Kejadian Gempabumi di Pulau Sumatra Tahun 2009-2018

Sebelum melakukan pemodelan, terlebih dahulu dilakukan analisa secara deskriptif masing-masing variabel yang diduga berpengaruh terhadap intensitas gempabumi di Sumatra. Analisis secara deskriptif berguna sebagai informasi awal dari data. Berikut merupakan hasil visualisasi kejadian gempabumi di Pulau Sumatra tahun 2009-2018.



(a)



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	152	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

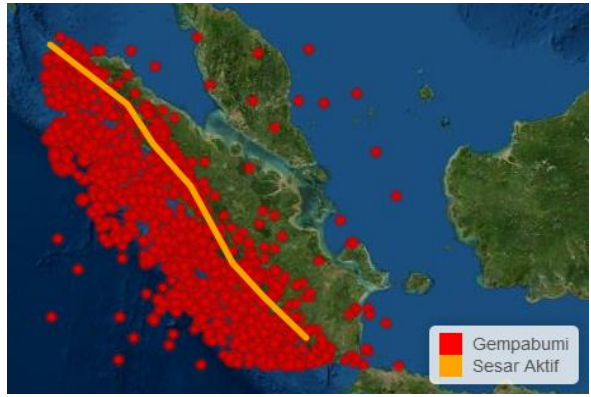
(b) (c)

Gambar 4.1. Persebaran Gempabumi di Pulau Sumatra

Gambar 4.1 (a) merupakan plot persebaran gempabumi di Pulau Sumatra pada tahun 2009-2018 dalam bentuk *point pattern*. Pada tahun 2009-2018 telah terjadi 2154 kejadian gempabumi di Pulau Sumatra dengan kekuatan gempa lebih besar sama dengan 4 Skala Richter. Berdasarkan Gambar 4.1 (b) dapat diketahui intensitas gempabumi di Pulau Sumatra, jika warna area semakin cerah menandakan bahwa area tersebut memiliki intensitas gempabumi yang semakin tinggi. Hal ini dijelaskan pada Gambar 4.1 (c) yang menunjukkan jumlah gempabumi pada setiap area 100 km^2 . Jumlah gempabumi yang paling banyak terjadi sebanyak 181 kejadian pada area 10000 km^2. Dari hasil ketiga plot tersebut, dapat dilihat bahwa gempabumi banyak terjadi di sepanjang lautan selatan pulau Sumatra.

4.1.2 Visualisasi Jarak Sesar dengan Kejadian Gempabumi di Pulau Sumatra

Wilayah Sumatra memiliki 19 segmen Patahan atau segmen sesar yang membentang sepanjang 1.900 km dari Banda Aceh hingga Teluk Semangko di selatan Lampung. Berikut merupakan hasil visualisasi lokasi sesar dengan lokasi kejadian gempabumi di Pulau Sumatra.

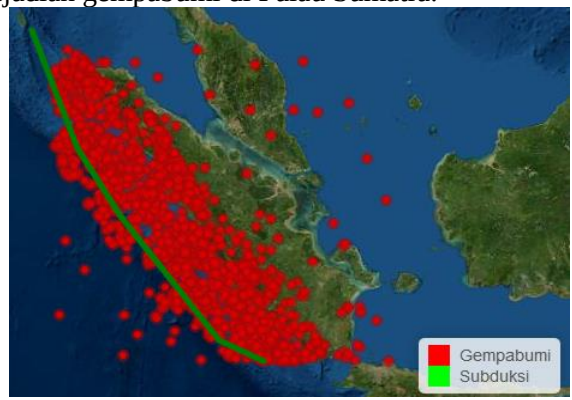


Gambar 4.2. Jarak Sesar dengan Kejadian Gempa Bumi di Pulau Sumatra

Lokasi sesar aktif di Pulau Sumatra dilambangkan dengan garis memanjang berwarna hijau. Kejadian gempabumi yang terjadi di Pulau Sumatra terlihat mengikuti dan berada di sekitar lokasi sesar aktif yang ada di Pulau Sumatra. Sesar aktif dan kejadian gempabumi merata di wilayah laut selatan pulau Sumatra.

4.1.3 Visualisasi Jarak Subduksi dengan Kejadian Gempabumi di Pulau Sumatra

Berikut merupakan hasil visualisasi lokasi subduksi dengan lokasi kejadian gempabumi di Pulau Sumatra.

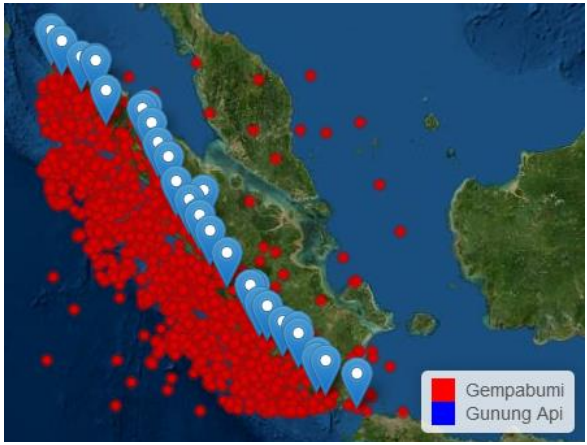


Gambar 4.3. Jarak Subduksi dengan Kejadian Gempabumi di Pulau Sumatra

Zona subduksi adalah zona yang menunjam masuk ke bawah lempeng benua sebagai batas pertemuan antar lempeng samudera. Pada Gambar 4.4 dapat diketahui bahwa secara visual kejadian gempabumi di Pulau Sumatra mengikuti zona subduksi yang melewati Pulau Sumatra.

4.1.4 Visualisasi Jarak Gunung Api dengan Kejadian Gempabumi di Pulau Sumatra

Wilayah Sumatra memiliki 30 gunung api yang menyebar di seluruh wilayah Sumatra. Berikut merupakan hasil visualisasi lokasi gunung api dengan lokasi kejadian gempabumi di Pulau Sumatra.



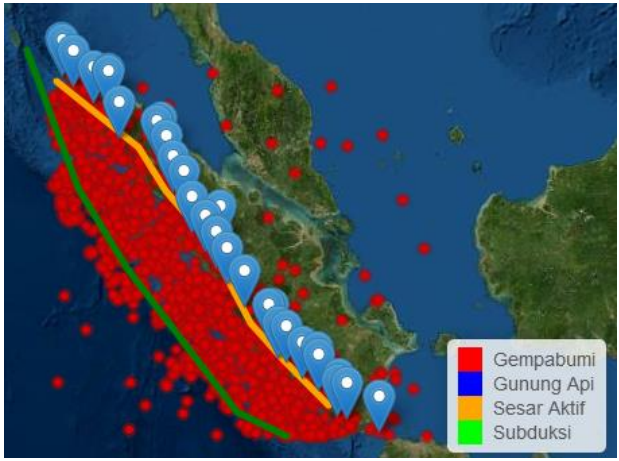
Gambar 4.4. Jarak Gunung Berapi dengan Kejadian Gempabumi di Pulau Sumatra

Berdasarkan Gambar 4.4, secara visual terlihat bahwa lokasi gunung berapi membentang di bagian daratan Pulau Sumatra sedangkan kejadian gempabumi yang terjadi di Pulau Sumatra didominasi berada di bagian laut Pulau Sumatra. Letak gunung berapi tersebar dari bagian barat hingga timur Pulau Sumatra dengan persebaran yang hampir merata. Hal ini juga berlaku pada kejadian gempabumi yang terjadi hampir menyebar di seluruh bagian selatan Pulau Sumatra. Terdapat pula gunung berapi yang

berada di sebelah utara Pulau Sumatra yang disekitarnya juga terdapat lokasi gempabumi.

4.1.5 Visualisasi Jarak Sesar, Subduksi dan Gunung Api dengan Kejadian Gempabumi di Pulau Sumatra

Berikut merupakan hasil visualisasi lokasi sesar, gunung api serta subduksi dengan lokasi kejadian gempabumi di Pulau Sumatra.



Gambar 4.5. Jarak Sesar, Subduksi, serta Gunung Api dengan Kejadian Gempa Bumi di Pulau Sumatra

Dari 19 Segmen Sesar Aktif Sumatra, 7 diantaranya terdapat di wilayah Provinsi Sumatra Barat yang merupakan zona-zona rentan bencana alam. Pada Gambar 4.5 dapat diketahui bahwa secara visual bahwa kejadian gempabumi di Pulau Sumatra berada di sekitar lokasi ketiga *covariate* tersebut yaitu lokasi sesar, gunung berapi serta zona subduksi yang berada di Pulau Sumatra.

4.2 Uji Stasioneritas

Uji stasioneritas digunakan untuk mengetahui data yang digunakan dibangkitkan dari proses stasioner atau tidak. Berikut merupakan hipotesis pada pengujian stasioneritas dengan menggunakan uji *chi-squared.*

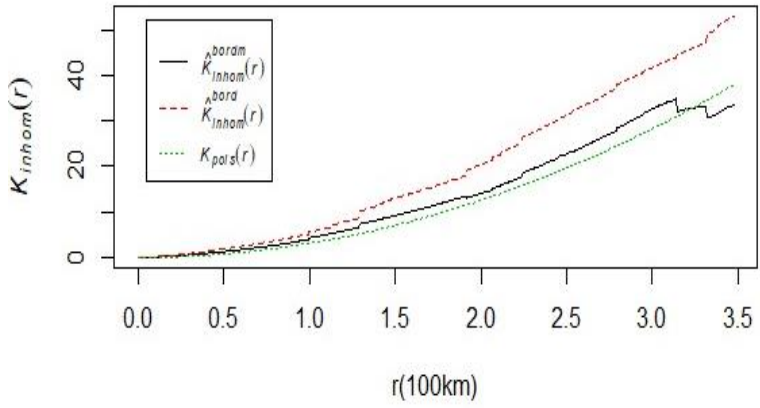
H_0: Data mengikuti pola stasioner

H_1: Data tidak mengikuti pola stasioner

Berdasarkan pengujian dengan menggunakan tingkat signifikansi $\alpha = 0{,}05$ maka data yang digunakan dapat dinyatakan bahwa data mengikuti pola stasioner apabila *p-value* > *0,05*. Pada hasil pengujian didapatkan nilai signifikansi sebesar 2.2e-16 (0,000) lebih kecil dari 0,05 yang dapat dilihat pada Lampiran 5. Selain itu pada pengujian ini didapatkan nilai χ^2_{hitung} sebesar 6936,7. Nilai $\chi^2_{(\alpha;m-1)}$ dengan menggunakan *alpha* 5% dan derajat bebas sebesar 103 didapatkan sebesar 128,803908. Nilai χ^2_{hitung} yang diperoleh lebih dari $\chi^2_{(\alpha;m-1)}$, maka keputusan yang di ambil adalah Tolak H_0. Kesimpulan yang didapatkan adalah data *spatial point pattern* yang digunakan tidak mengikuti pola yang stasioner.

4.3 Ripley K-function

Sebaran data dapat diketahui dengan menggunakan *K-function Plot*. *K-function Plot* digunakan untuk menentukan klasifikasi *spasial point pattern* apakah reguler/saling menjauh indenpenden/acak, dan *clustering*/mengelompok. *K-function plot* data gempabumi di Pulau Sumatra pada gambar berikut.



Gambar 4.6. *K-function Plot* untuk mendeteksi sebaran data

Pada Gambar 4.6 diketahui bahwa garis proses *Poisso*n berada di bawah garis K-*function* data yang berarti terdapat korelasi antara titik-titik dalam proses spasial sehingga asumsi independensi tidak terpenuhi dan cenderung memiliki sebaran yang berkelompok atau mengklaster. Dengan demikian model yang dapat digunakan untuk data gempabumi dengan magnitudo lebih besar sama dengan 4 di Pulau Sumatra adalah *Cox Process*

4.4 Estimasi Parameter

Pada penelitian ini, estimasi parameter dilakukan dalam dua langkah. Langkah pertama menggunakan metode *Berman-Turner approximation* untuk mengestimasi parameter $\boldsymbol{\beta}$. Langkah yang kedua menggunakan metode *Second Order Composite Likelihood* untuk mengestimasi parameter σ^2 dan γ. Pemilihan model terbaik menggunkan *backward* yaitu seleksi variabel bekerja dengan cara memasukkan semua variabel independen terlebih dahulu, kemudian variabel yang tidak berpengaruh signifikan dalam model akan dikeluarkan dalam model. Pada pemodelan pertama yaitu model lengkap didapatkan bahwa jarak terdekat gunung api terhadap gempabumi tidak signifikan dikarenakan *Z-value* yang didapatkan sebesar 0.7726 lebih kecil dari nilai kritis Z pada alpha 0.05 yaitu sebesar 1.96 seperti pada Lampiran 15, sehingga selanjutnya variabel jarak gunung api dikeluarkan dari model. Dari estimasi yang telah dilakukan setelah variabel jarak terdekat gunung api dikeluarkan, maka diperoleh hasil sebagai berikut.

Tabel 4.1 Nilai Estimasi $\hat{\boldsymbol{\beta}}$, $\hat{\sigma}^2$, dan $\hat{\boldsymbol{\gamma}}$

Parameter	Koefisien	Exp(Koef)	*Z-value*
$\hat{\beta}_0$	4.6894	108.7879	20.7619
$\hat{\beta}_1$ (Sesar)	-0.5236	0.5924	-6.6682
$\hat{\beta}_2$ (Subduksi)	-0.6361	0.5294	-8.494
σ^2	1.5614		
γ	0.2536		

Jarak sesar aktif dan zona subduksi terhadap gempabumi memiliki nilai absolut *Z-value* yang lebih besar dari nilai kritis Z dengan $\alpha = 0.05$ sebesar 1.96 , sehingga secara stastistik jarak sesar aktif dan zona subduksi terhadap lokasi gempabumi di Pulau Sumatra berpengaruh signifikan terhadap jumlah gempabumi yang terjadi di sekitar wilayah tersebut. Hasil estimasi parameter variabel jarak gempabumi ke sesar terdekat bernilai negatif yang memberikan arti bahwa semakin jauh jarak antara gempabumi dan sesar terdekat akan menurunkan risiko gempabumi yang terjadi di wilayah tersebut. Hasil estimasi parameter jarak gempabumi dengan subduksi terdekat juga bernilai negatif, sehingga berbanding terbalik dengan risiko gempabumi di wilayah tersebut. Dari hasil estimasi yang dilakukan diperoleh fungsi intensitas *Inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process* sebagai berikut.

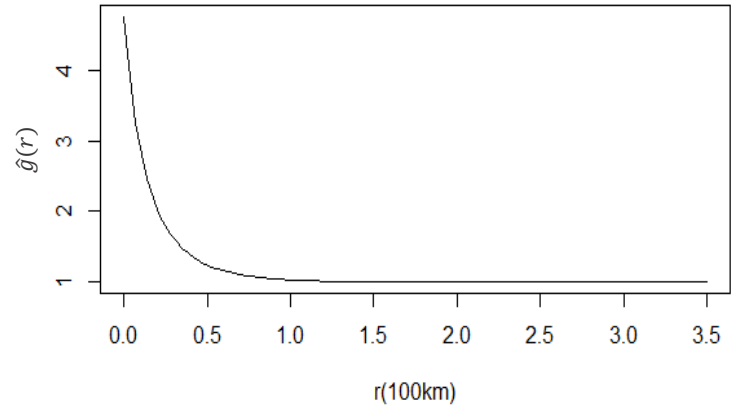
$$\rho(u) = \exp(4.6894 - 0.5236Z_1(u) - 0.6361Z_2(u)) \qquad (4.1)$$

Berdasarkan persamaan 4.1, diperoleh beberapa informasi. Jika jarak pusat gempa ke sesar aktif bertambah 100 km, maka risiko terjadi gempabumi di lokasi tersebut menurun 0.5924 kali. Jika pusat gempabumi memiliki jarak ke zona subduksi bertambah 100 km, maka risiko terjadinya gempabumi di lokasi tersebut menurun 0.5294 kali. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin dekat suatu lokasi di Sumatra ke zona subduksi dan sesar aktif maka akan meningkatkan risiko terjadinya gempabumi di lokasi tersebut.

Pair Correlation untuk pemodelan gempabumi Sumatra dengan menggunkan I*nhomogeneous Log-Gaussian Cox Process* pada persamaan berikut.

$$g_{(\sigma^2,\gamma)} = \exp(1.5614\exp(-r / 0.2536)) \qquad (4.2)$$

Pair correlation juga dapat disajikan dalam bentuk plot. Berikut merupakan estimasi *plot* $g_{(\sigma^2,\gamma)}$ persamaan 4.2.

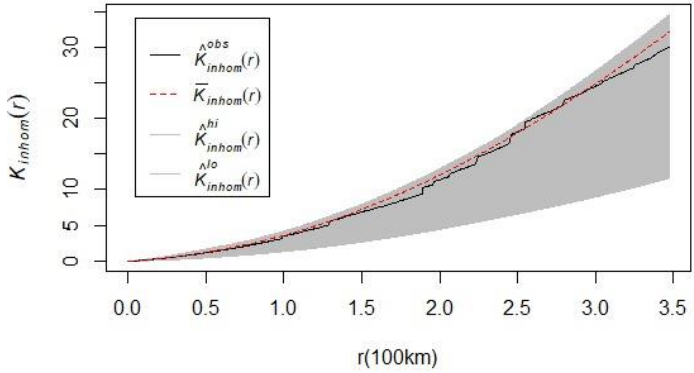


Gambar 4.7. *Pair Correlation Plot* Model *Inhomogeneous LGCP* Gempabumi di Sumatra

Nilai *pair correlation* model *Inhomogeneous* LGCP untuk radius 0 hingga 350 km bernilai lebih dari 1. Jika nilai *pair correla tion* lebih dari 1, maka sesuai bahwa pola titik gempa-bumi pada model I*nhomogeneous* LGCP membentuk pola yang cenderung mengelompok atau cluster. Pada radius yang sangat kecil (mende-kati 0 km), *pair correlation* bernilai 4.765490, pada radius 120 km *pair correlationnya* bernilai 0.013848, dan pada radius 350 km ber nilai 1,000002.

4.5 Kebaikan Model

Pada penelitian ini untuk mengetahui kebaikan model menggunakan *envelope K-function.* Visualisasi *plot envelope K-Function* dari data gempabumi sebagai berikut.

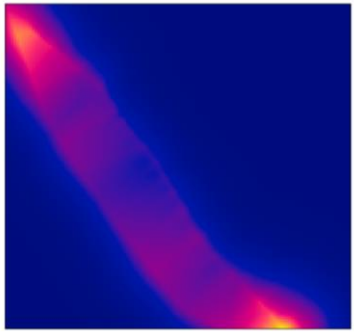


Gambar 4.8. Kebaikan Model Gempabumi Sumatra menggunakan *envelope K-function*

Area abu-abu merupakan area interval *envelope*. Pada gambar 4.8 diketahui bahwa *K-function* data berada pada area berwarna abu-abu atau berada dalam interval *envelope K-function*. Sehingga model *inhomogeneous Log-Gaussaian Cox Process* pada persamaan (4.1) dan (4.2) dapat dikatakan model yang baik.

4.6 Pemetaan Hasil Pemodelan

Berdasarkan model yang telah diperoleh, dapat dilakukan pemetaan risiko kejadian gempabumi di Pulau Sumatra. Gambar 4.9 berikut merupakan visualisasi dari pemetaan prediksi risiko gempabumi Pulau Sumatra.



Gambar 4.9. Pemetaan Prediksi Risiko Gempabumi

Risiko gempabumi di Sumatra dilambangkan dengan warna. Jika warna area semakin cerah menandakan bahwa area tersebut memiliki risiko terjadinya gempabumi yang semakin tinggi. Pemetaan hasil pemodelan yang telah didapatkan memperlihatkan bahwa lokasi di Pulau Sumatra yang memiliki risiko gempabumi yang tinggi berada di ujung barat dan ujung timur Pulau Sumatra. Daerah yang memiliki risiko tinggi terjadinya gempabumi yaitu Provinsi Lampung, dan Provinsi Aceh. Pemetaan kejadian gempabumi ini terletak membentang dan memanjang mengikuti pola zona subduksi dan sesar aktif.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh berdasarkan analisis dan pembahasan yang diuraikan pada Bab IV yaitu sebagai berikut.

1. Pada tahun 2009-2018 telah terjadi 2154 kejadian gempabumi di Pulau Sumatra dengan kekuatan gempabumi lebih besar sama dengan 4 Skala Richter serta gempabumi banyak terjadi di sepanjang lautan selatan pulau Sumatra. Secara visual bahwa kejadian gempabumi di Pulau Sumatra berada di sekitar lokasi ketiga *covariate* tersebut yaitu lokasi sesar, gunung berapi serta zona subduksi yang berada di Pulau Sumatra.
2. Pada pemodelan pertama didapatkan bahwa jarak terdekat gunung api terhadap gempabumi tidak signifikan sehingga selanjutnya variabel jarak gunung api dikeluarkan dari model. Model terakhir didapatkan bahwa secara stastistik jarak sesar aktif dan zona subduksi terhadap lokasi gempabumi di Pulau Sumatra berpengaruh signifikan terhadap risiko gempabumi yang terjadi di sekitar wilayah tersebut. Jika jarak pusat gempabumi ke sesar aktif bertambah 100 km, maka risiko terjadi gempabumi di lokasi tersebut menurun 0.5924 kali. Jika pusat gempabumi memiliki jarak ke zona subduksi bertambah 100 km, maka risiko terjadinya gempabumi di lokasi tersebut menurun 0.5294 kali. Semakin dekat suatu lokasi di Sumatra ke zona subduksi dan sesar aktif akan meningkatkan risiko terjadinya gempabumi di lokasi tersebut.
3. Pemetaan hasil pemodelan yang telah didapatkan memperlihatkan bahwa lokasi di Pulau Sumatra yang memiliki risiko gempabumi yang tinggi berada di ujung barat yaitu Provinsi Aceh dan ujung timur Pulau Sumatra yaitu Provinsi Lampung yang keduanya berdekatan dengan sesar aktif dan zona subduksi.

5.2 Saran

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang diberikan. Letak gunung api dan sesar terlihat hampir sama dan memungkinkan jika terdapat korelasi yang sangat tinggi dimana pada penelitian ini tidak dianalisis secara mendalam sehingga dapat diperhatikan untuk penelitian selanjutnya yaitu memperhatikan korelasi antar variabel prediktor (Choiruddin, et al. 2018*)*. Saran penelitian selanjutnya juga dapat mempertimbangkan karakteristik gempabumi yang lain seperti perbedaan kedalaman gempabumi dengan menggunakan *Multitype Log-Gaussian Cox Process* (Choiruddin, et al. 2020a*)* untuk penelitian selanjutnya.

Saran yang diberikan bagi pihak penanggulangan bencana untuk memantau aktivitas sesar serta subduksi yang berada di Wilayah Sumatra, mempertimbangkan dan mengawasi kegiatan masyarakat di area yang memiliki risiko gempabumi yang tinggi, memberikan rambu-rambu peringatan bahaya gempabumi di sekitar wilayah sesar dan zona subduksi serta mempersiapkan peralatan dan bahan untuk penangan daurat bencana gempabumi yang disiagakan di area tersebut. Selain itu dapat pula memasang alat pendeteksi gempabumi di lokasi-lokasi yang dekat dengan lokasi sesar aktif serta zona subduksi.

DAFTAR PUSTAKA

Amri, Khoirul. 2010. *Wilayah Risiko Bencana Gempabumi pada Jalur Patahan Semangko di Kabupaten Tanah Datar Provinsi Sumatra Barat*. Skripsi. Depok: Universitas Indonesia

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. 2004. *Waspada Gempa*. Jakarta.

Baddeley, A., Rubak, E., & Turner, R. 2015. *Spatial Point Patterns Methodology and Applications with R*.

Baddeley, A., Gregori P, Mateu J, Stoica R, & Stoyan D. 2006. *Case studies in spatial point pattern modelling*. Lecture Notes in Statistics, Springer, New York, p 185

Bronto, S. 1996. *Apa yang Dapat Dilakukan oleh Ilmuwan Yogyakarta terhadap Gunungapi Merapi dan Lingkungan Hidup di Sekitarnya?*. Yogyakarta: STTN.

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.

Choiruddin, A., Coeurjolly, J.-F., & Letué, F. 2018. *Convex and Non-Convex Regularization Methods for Spatial Point Processes Intensity Estimation*. Electronic Journal of Statistics, 12(1), 1210–1255.

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.

Elnashai, A.S., & Sarno, D.L. 2008. *Fundamental of Earthquake Engineering*. Antony Rowe Ltd. Chippenham. Wilts. England.

Gunawan I & Subarjo, 2005. *Pengantar Seismologi***.** Badan Meteorologi dan Geofisika: Jakarta.

Jonathan. 2009. *Upaya Riksa*. Emergency and Preparedness Response.

Malik. 2009. *Analisa Pola Subduksi Daerah Bengkulu dengan Metode Segmen Irisan Vertikal*, Skripsi, Jakarta: Akademi Meteorologi dan Geofisika.

Metrikasari, R., & Choiruddin, A. 2020. *Pemodelan Risiko Gempabumi di Pulau Sumatra Menggunakan Model Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process.* Submitted.

Møller, J., & Waagepetersen, R., 2004. *Statistical inference and simulation for spatial point processes*. CRC Press.

Natawidjaja, D.H. 1994. *Quantitative geological assessments of Liwa earthquake 1994. Proceeding of Annual Convention of Indonesian Association of Geophysicists* (HAGI).

Natawidjaja, D. H. 2012. *Tectonic Setting Indonesia dan Pemodelan Sumber Gempa dan Tsunami*. Geoteknologi-LIPI.

Natawidjaja, D.H. 2007. *Gempabumi dan Tsunami di Sumatra dan Upaya Untuk Mengembangkan Lingkungan Hidup Yang Aman Dari Bencana Alam*.

Pasau, G., & Tanauma, A. 2011. *Pemodelan Sumber Gempa Di Wilayah Sulawesi Utara Sebagai Upaya Mitigasi Bencana Gempabumi.* Universitas San Ratulangi Manado:Fisika FMIPA.

Ripley, B.D. 1977. *Modelling spatial patterns (with discussion). Journal of the Royal Statistical Society*, Series B, 39:172–212,.

Sieh, K., & Natawidjaja, D. 2000. *Neotectonics of The Sumatra Fault Indonesia*. J. Geophys.

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.

Sunarjo., Gunawan, M.T., & Pribadi, S. 2012. *Gempa Bumi Indonesia Edisi Populer*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.

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.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Gempabumi Sumatra Magnitudo ≥ 4 Tahun 2009-2018

No	Tanggal	Latitude	Longitude	Magnitudo (SR)
1	2009-01-01 16:57:53	-4.42	101.07265	5.25
2	2009-01-01 18:37:24	-4.37	101.11667	5.12
3	2009-01-05 16:54:42	-3.64	100.48566	5.15
4	2009-01-07 02:39:41	2.57	95.85345	4.01
5	2009-01-07 02:43:19	2.58	97.57042	4.24
6	2009-01-08 11:40:46	2.04	96.70520	4.81
7	2009-01-09 06:54:47	-2.11	99.71919	5.19
8	2009-01-11 19:50:44	-1.78	99.42982	4.91
9	2009-01-11 21:31:36	-5.85	105.99502	4.03
10	2009-01-12 02:04:24	3.31	95.99723	4.51
11	2009-01-12 22:14:07	2.85	95.72900	5.33
12	2009-01-13 13:50:33	-1.42	99.99507	4.33
13	2009-01-21 14:25:13	-2.26	100.32025	4.60
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2143	2018-12-22 21:46:32	-0.40	99.17020	4.67
2144	2018-12-23 14:03:56	-0.50	99.66815	4.99
2145	2018-12-23 22:48:37	4.97	95.90420	4.29
2146	2018-12-23 23:41:38	4.97	95.88865	4.51
2147	2018-12-25 22:55:27	-1.27	96.99523	4.72
2148	2018-12-26 10:23:13	3.12	97.31047	4.52
2149	2018-12-29 08:15:23	0.97	97.15440	4.95
2150	2018-12-29 08:23:20	1.07	97.69904	4.47
2151	2018-12-29 16:12:08	-2.33	99.78630	4.75
2152	2018-12-30 08:39:11	-2.67	102.30189	5.76
2153	2018-12-30 18:22:38	-0.49	98.02605	4.18
2154	2018-12-31 14:31:06	0.47	98.59483	4.2

Lampiran 2 Data Sesar Aktif Sumatra

No	x0	y0	x1	y1
1	5.648	95.125	3.521	97.812
2	3.521	97.812	2.552	98.364
3	2.121	98.682	0.586	100.002
4	0.586	100.002	-2.193	101.484
5	-2.193	101.484	-3.419	102.571
6	-3.419	102.571	-4.865	104.016
7	-4.865	104.016	-5.872401	104.884

Lampiran 3 Data Subduksi Sumatra

No	x0	y0	x1	y1
1	6.647552	9.416012	2.189	95.824
2	2.189	95.824	-0.385	97.447
3	-0.385	97.447	-1.223	98.021
4	-1.223	98.021	-3.164	99.52.00
5	-3.164	99.52.00	-5.08	101.022
6	-5.08	101.022	-5.872401	102.678
7	-5.872401	102.678	-5.872401	105.748

Lampiran 4 Data Gunung Api Sumatra

No	Tanggal	Latitude	Longitude
1	Belirang-Beriti	-2.82	102.18
2	Besar	-4.43	103.67
3	Bukit Daun	-3.38	102.37
4	Bukit Lumut Balai	-4.23	103.62
5	Dempo	-4.03	103.13
6	Geureudong	4.813	96.82
7	Helatoba-Tarutung	2.03	98.93
8	Hulubelu	-5.35	104.6
9	Kaba	-3.52	102.62
10	Kerinci	-1.697	101.264
11	Marapi	0.381	100.473
12	Pendan	-2.82	102.02
13	Peuet Sagoe	4.914	96.329
14	Rajabasa	-5.78	105.625
15	Seulawah Agam	5.448	95.658
16	Sibayak	3.23	98.52
17	Sibualbuali	1.556	99.255
18	Sinabung	3.17	98.392
19	Sorikmarapi	0.686	99.539
20	Suoh	-5.248756	104.26999
21	Talakmau	0.079	99.98
22	Talang	-0.973365	100.684
23	Tandikat	-0.429	100.32
24	Weh	5.82	95.28
25	Bur ni Telong	4.769	96.821
26	Gayo Leuser	3.756549	97.1736
27	Pusuk Buhit	2.699455	98.71048
28	Sekincau Belirang	-5.105747	104.31472
29	Jaboe	5.808898	95.31778
30	Singgalang	-0.389027	100.3309

Lampiran 5. Syntax R Input Data

```
### Install Package ###
library(maptools)
library(spatstat)
library(rgdal)
library(shapefiles)
library(sp)
library(dplyr)
library(readxl)
library(RandomFields)
library(RandomFieldsUtils)
library(raster)
library(leaflet)

### Input Data ###
Gempa <- read_excel('E:/Spatial Point Process/Magnitudo 1/Magnitudo 4.xlsx')
Sesar<-read.csv('E:/Spatial Point Process/DATA TA/Sesar sumatra.csv')
subduksi<-read.csv('E:/Spatial Point Process/DATA TA/Subduksi sumatra.csv')
Gunungapi<-read_excel('E:/Spatial Point Process/gunung api aktif.xlsx')

###Deteksi point gempabumi yang sama###
Data<-distinct(Gempa,latitude,longitude,.keep_all=TRUE)

###Memotong Data Gempabumi di Wilayah Sumatra ###
ii<-with(Data,which(latitude<(-5.872401),arr.ind=TRUE))
Datasum1<-Data[-ii,]
ll<-with(Datasum1,which(longitude>107.473420,arr.ind=TRUE))
Datasumatra<-Datasum1[-ll,]
View(Datasumatra)

###Memotong Data Gunungapi di Wilayah Sumatra ###
j<-with(Gunungapi,which(Latitude<(-5.872401),arr.ind=TRUE))
Gunungsum2<-Gunungapi[-j,]
i<-with(Gunungsum2,which(Longitude>107.473420,arr.ind=TRUE))
GunungapiSumatra<-Gunungsum2[-i,]
View(GunungapiSumatra)
```

Lampiran 6. Syntax R Karakteristik Persebaran Gempabumi

```
datasumatra_1 = Datasumatra
datasumatra_1[,6]="Gempabumi"

gunungapiSM_1 = GunungapiSumatra
gunungapiSM_1[,4]="Gunung Api"

sesar_1 = Sesar[,1:2]
sesar_1[,3] = "Sesar Aktif"

subduksi_1 = subduksi[,1:2]
subduksi_1[,3] = "Subduksi"

pal = colorFactor(palette = c("red","blue","orange","green"), domain =
c(datasumatra_1$V6,sesar_1$V3,subduksi_1$V3,gunungapiSM_1$V4),
ordered=F)
m <- leaflet() %>%
  setView(lng=101.3431058, lat=0.589724, zoom=5 ) %>%

  # Add two tiles
  addProviderTiles("Esri.WorldImagery") %>%

  # Add marker groups
  addCircleMarkers(data=datasumatra_1, lng=~datasumatra_1$longitude ,
          lat=~datasumatra_1$latitude, radius=3 ,color="#A80606",
          fillColor="red",  stroke = TRUE, fillOpacity = 1, group="Magnitudo
          (SR)") %>%
  addMarkers(data=gunungapiSM_1, lng=~gunungapiSM_1$Longitude ,
          lat=~gunungapiSM_1$Latitude, group="vulcanoSM", label =
          gunungapiSM_1$Nama) %>%
  addPolylines(data = sesar_1, lng = ~sesar_1[,2], lat = sesar_1[,1],
          color="orange", opacity = 1, group = "sesar") %>%
  addPolylines(data = subduksi_1, lng = ~subduksi_1[,2], lat = subduksi_1[,1],
          color="green", opacity = 1, group = "subduksi") %>%

  # Add Legend
  addLegend(position = "bottomright", pal = pal, values =
c(datasumatra_1$V6,sesar_1$V3,subduksi_1$V3,gunungapiSM_1$V4),opacity
=1)

m
```

Lampiran 7. *Syntax* R Mengubah Satuan Derajat Menjadi 100 KM

```
###Menentukan Window Sumatra dalam 100Km###
windowgempaSumatra<-owin
(xrange=c(94.160120*111/100,107.473420*111/100),yrange=c(-
5.872401*111/100,6.647552*111/100))
area.window<-area.owin(windowgempaSumatra)
windowgempaSumatra

####Membuat Point Pattern gempa bumi###
longgempa<-Datasumatra$longitude*111/100
latgempa<-Datasumatra$latitude*111/100
gempaSumatra<-ppp(longgempa,latgempa,window = windowgempaSumatra)
#point pattern gempa sumatera#
gempaSumatra
plot(density(gempaSumatra))

##Sesar Aktif Sumatera##
x0sesar<-Sesar$x0*111/100
y0sesar<-Sesar$y0*111/100
x1sesar<-Sesar$x1*111/100
y1sesar<-Sesar$y1*111/100
SesarSumatra<-psp(y0sesar,x0sesar,y1sesar,x1sesar,window =
windowgempaSumatra)

##Subduksi Sumatera##
x0sub<-subduksi$x0*111/100
y0sub<-subduksi$y0*111/100
x1sub<-subduksi$x1*111/100
y1sub<-subduksi$y1*111/100
SubduksiSumatra<-psp(y0sub,x0sub,y1sub,x1sub,window =
windowgempaSumatra)

##Gunung Api Aktif Sumatra ##
latgunung<-gunungapiSM$Latitude*111/100
longgunung<-gunungapiSM$Longitude*111/100
GunungSumatra<-ppp(longgunung,latgunung,window =
windowgempaSumatra)
plot(GunungSumatra)
```

Lampiran 8. *Syntax R* Intensitas Gempabumi

```
###banyaknya gempa pada window Sumatra ###
Jumlahgempa<-gempaSumatra$n
Jumlahgempa

###intensitas (rho) gempa Sumatra###
intensitas<-Jumlahgempa/area.window
intensitas
```

Lampiran 9. *Syntax R* Uji Stasioneritas

```
gridgempaSumatra<-quadratcount(gempaSumatra,8,13)
ujihomogenitas<-quadrat.test(gridgempaSumatra)
ujihomogenitas
```

Lampiran 10. *Syntax R* Pola Persebaran Data

```
ind.test<-Kinhom(gempaSumatra)
plot(ind.test, legendargs=list(cex=0.5, xpd=TRUE),xlab = "r(100km)")
```

Lampiran 11. *Syntax R* Jarak Sesar, Subduksi, dan Gunung Api ke Gempabumi Terdekat

```
# Jarak Sesar ##
gempa.dfault<-with(gempaSumatra,distfun(SesarSumatra))
plot(gempa.dfault)
summary(gempa.dfault)

## Jarak Subduksi ##
gempa.dsub<-with(gempaSumatra,distfun(SubduksiSumatra))
plot(gempa.dsub)
summary(gempa.dsub)
```

Lampiran 12. *Syntax R* Jarak Sesar, Subduksi, dan Gunung Api ke Gempabumi Terdekat (Lanjutan)

```
## Jarak Gunungapi ##
gempa.dvol<-with(gempaSumatra,distfun(GunungSumatra))
plot(gempa.dvol)
summary(gempa.dvol)
```

Lampiran 13. *Syntax R* Pemodelan

```
###Pemodelan Inhomogeneous LGCP Lengkap###
model1<-kppm(gempaSumatra ~
gempa.dfault+gempa.dsub+gempa.dvol,"LGCP", method="clik2")
model1
summary(model1)

####Pemodelan Inhomogeneous LGCP Tanpa Variabel Gunungapi###
model2<-kppm(gempaSumatra ~ gempa.dfault+gempa.dsub,"LGCP",
method="clik2")
model2
summary(model2)

###Plot Pair Correlation###
b<-pcfmodel(model2)
b(seq(from = 0, to = 3.5, by=0.1))
curve(b,from = 0, to=3.5, xlab = "r(100km)", ylab = "g(r)")

####Kebaikan Model ###
plot(envelope (model2,Kinhom,nsim=500), legendargs=list(cex=0.5),xlab =
"r(100km)")

###Prediksi Risiko Hasil Pemodelan###
a<-Predict.kppm(model2)
plot(a)
```

Lampiran 14. Output R Uji Stasioneritas

```
Chi-squared test of CSR using quadrat counts
Pearson X2 statistic

data:
X2 = 6936.7, df = 103, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: two.sided
```

Lampiran 15. *Output R* Model Lengkap

```
----------- COX MODEL -----------
Model: Log-Gaussian Cox process

        Covariance model: exponential
Fitted covariance parameters:
      var     scale
1.5616761 0.2547197
Fitted mean of log of random intensity: [pixel
image]

Final standard error and CI
(allowing for correlation of Cox process):
               Estimate       S.E.    CI95.lo
(Intercept)   4.6410629 0.23242772  4.1855129
gempa.dfault -0.7744195 0.33901229 -1.4388713
gempa.dsub   -0.6241086 0.07766795 -0.7763350
gempa.dvol    0.2732136 0.35364566 -0.4199192
                CI95.hi Ztest       Zval
(Intercept)   5.0966129   *** 19.9677688
gempa.dfault -0.1099676     * -2.2843404
gempa.dsub   -0.4718823   *** -8.0356012
gempa.dvol    0.9663463        0.7725631
```

Lampiran 16. *Output R* Model Tanpa Variabel Gunung Api

```
----------- COX MODEL -----------
Model: log-Gaussian Cox process

         Covariance model: exponential
Fitted covariance parameters:
      var     scale
1.5614004 0.2535884
Fitted mean of log of random intensity: [pixel image]

Final standard error and CI
(allowing for correlation of Cox process):
               Estimate       S.E.    CI95.lo
(Intercept)   4.6894181 0.22586621  4.2467285
gempa.dfault -0.5235562 0.07851543 -0.6774436
gempa.dsub   -0.6361314 0.07488331 -0.7828999
                CI95.hi Ztest      Zval
(Intercept)   5.1321077   *** 20.761928
gempa.dfault -0.3696688   *** -6.668196
gempa.dsub   -0.4893628   *** -8.494969
```

Lampiran 17. Surat Pernyataan Data

SURAT PERNYATAAN

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

Nama : Khalimatus Sakdiyah

NRP : 06211640007002

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 : Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG)

Keterangan : Data Gempabumi 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, S.Si., M.Sc)
NIP. 19691201911101

Surabaya, 12 Juni 2020

(Khalimatus S)
NRP. 06211640007002

*(coret yang tidak perlu)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS

Penulis dilahirkan di Jombang, 6 Maret 1998 dengan nama lengkap Khalimatus Sakdiyah namun biasa dipanggil Khalim. Penulis merupakan anak tunggak dari pasangan Samsul Huda (Alm) dan Mustofiah. Pendidikan formal yang ditempuh oleh penulis antara lain MI Miftahul Ulum Temon Mojokerto (2004-2010), MTsN Mojokerto (2010-2013) yang sekarang menjadi MTsN 2 Mojokerto, dan MA Unggulan Darul 'Ulum Jombang (2013-2016). Setelah lulus, penulis melanjutkan pendidikan formal di Program Studi Sarjana Departemen Statistika ITS. Penulis diterima di ITS pada tahun 2016 melalui jalur Beasiswa yaitu Program Beasiswa Santri Berprestasi (PBSB) yang dinaungi oleh Kementerian Agama. Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam kegiatan organisasi, kepanitiaan, dan pelatihan. Organisasi kampus yang pernah di ikuti oleh penulis adalah Himpunan Mahasiswa Statistika ITS (HIMASTA-ITS) sebagai Bendahara II periode 2017-2018 dan Bendahara I pada periode 2018-2019. Selain itu, penulis juga pernah menjabat sebagai Bendahara Umum CSSMoRA-ITS periode 2018-2019. Penulis juga aktif dalam kepanitiaan yang diadakan oleh HIMASTA-ITS seperti Pekan Raya Statistika (PRS) 2019 sebagai Bendahara Subevent Data Analysis Competition (DAC) serta kepanitiaan dalam kegiatan yang diadakan oleh HIMASTA-ITS lainnya. Bagi pembaca yang ingin memberikan saran dan kritik serta berdiskusi mengenai Tugas Akhir ini dapat menghubungi penulis melalui *e-mail* khalimsakdiyah273@gmail.com.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)