TUGAS AKHIR – KS184822

ANALISIS RISIKO GEMPABUMI DI SULAWESI-MALUKU MENGGUNAKAN *INHOMOGENEOUS NEYMAN-SCOTT COX PROCESS*

FINOLA TRISNISA
NRP 062116 4000 0020

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

ANALISIS RISIKO GEMPABUMI DI SULAWESI-MALUKU MENGGUNAKAN *INHOMOGENEOUS NEYMAN-SCOTT COX PROCESS*

FINOLA TRISNISA
NRP 062116 4000 0020

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

EARTHQUAKE RISK ANALYSIS IN SULAWESI-MALUKU USING *INHOMOGENEOUS NEYMAN-SCOTT COX PROCESS*

FINOLA TRISNISA
SN 062116 4000 0020

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

ANALISIS RISIKO GEMPABUMI DI SULAWESI-MALUKU MENGGUNAKAN *INHOMOGENEOUS NEYMAN-SCOTT COX PROCESS*

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 :
Finola Trisnisa
NRP. 06211640000020

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

Mengetahui,
Kepala Departemen Statistika

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

SURABAYA, JULI 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALISIS RISIKO GEMPABUMI DI SULAWESI-MALUKU MENGGUNAKAN *INHOMOGENEOUS NEYMAN-SCOTT COX PROCESS*

Nama Mahasiswa	**:**	**Finola Trisnisa**
NRP	**:**	**062116 4000 0020**
Departemen	**:**	**Statistika-FSAD-ITS**
Dosen Pembimbing	**:**	**Dr. Achmad Choiruddin, S.Si., M.Sc.**

ABSTRAK

Sulawesi-Maluku merupakan wilayah di Indonesia dengan tingkat risiko tertinggi terhadap kejadian gempabumi. Hal ini disebabkan oleh tatanan tektonik yang kompleks serta letak Sulawesi-Maluku yang sangat dekat dengan zona pertemuan antar lempeng. Penelitian ini berfokus pada 3 variabel prediktor yang diduga berpengaruh terhadap risiko terjadinya gempabumi di Sulawesi-Maluku yaitu jarak gempabumi ke sesar, subduksi dan gunung api terdekat. Ketiga faktor geologis tersebut diperkirakan dapat memicu terjadinya gempabumi. Hasil analisis eksplorasi data menggunakan pengujian Chi-squared dan plot K-function menunjukkan bahwa persebaran gempabumi cenderung membentuk klaster dan tidak homogen yang dimungkinkan karena proses alami gempabumi utama dan susulan serta efek faktor geologis. Hal ini memotivasi penulis untuk melakukan pemodelan menggunakan inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process (NSCP). Hasil pemodelan menunjukkan bahwa variabel jarak terdekat gempabumi ke subduksi dan gunung api berpengaruh signifikan. Setiap penambahan 100 KM jarak suatu lokasi ke gunung api terdekat, maka peluang terjadinya gempabumi di lokasi tersebut akan berkurang 0,760 kali dan akan berkurang 0,696 kali setiap penambahan 100 KM jarak suatu lokasi ke subduksi terdekat. Hasil validasi model inhomogeneous NSCP baik dalam memodelkan gempabumi di Sulawesi-Maluku pada klaster dengan radius tidak lebih dari 260 KM. Wilayah dengan risiko gempabumi tinggi cenderung berada pada bagian utara dan selatan wilayah Sulawesi-Maluku.

Kata kunci: Gunung Api, Sesar, Spatial Point Pattern, Spatial Point Process, Subduksi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

EARTHQUAKE RISK ANALYSIS IN SULAWESI-MALUKU USING *INHOMOGENEOUS NEYMAN-SCOTT COX PROCESS*

Name	**:**	**Finola Trisnisa**
Student Number	**:**	**062116 4000 0020**
Department	**:**	**Statistics**
Supervisors	**:**	**Dr. Achmad Choiruddin, S.Si., M.Sc.**

ABSTRACT

Sulawesi-Maluku has the highest level of earthquake risk in Indonesia. It has a complex tectonic structure and located very close to the meeting zone between plates. This study focus on 3 covariates that can affect the intensity of the earthquake in Sulawesi-Maluku. The covariates are the distances from an epicenter (a point) to the nearest fault, the distances an epicenter to the nearest subduction, and the distances an epicenter to the nearest volcano. These three geological factors are expected to trigger earthquakes. The results of data exploration analysis using Chi-squared testing and K-function plots indicate that the distribution of earthquakes tends to form clusters and inhomogeneous. These results are likely due to the natural processes of mainshocks, aftershocks, and geological factor effects. This motivated writer to do modeling using inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process (NSCP). Modeling results show that the distance of the epicenter to the nearest subduction and volcano has a significant effect. Each addition of 100 KM distance of a location to the nearest volcano, the chance of an earthquake occurring in that location will decrease by 0.760 times and will decrease by 0.696 times for every addition of 100 KM of the distance of a location to the nearest subduction. Inhomogeneous NSCP model appropriate in modeling the earthquake in Sulawesi-Maluku in the cluster with a radius of no more than 260 KM. Areas with high earthquake risk tend to be in the north and south of the Sulawesi-Maluku region.

Keywords: Faults, Spatial Point Patterns, Spatial Point Processes, Subduction, Volcanoes.

(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 "**Analisis Risiko Gempabumi di Sulawesi-Maluku Menggunakan *Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Process***" 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 Pinarto dan Ibu Eny Widayati, dan keluarga tercinta yang sudah mendoakan tiada henti dan memberi dukungan baik secara moril mau-pun materiil kepada penulis.
2. 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.
3. Dr. Agus Suharsono, M.S. dan Wibawati, S.Si., M.Si. selaku dosen penguji yang telah memberikan koreksi dan masukan dengan sangat sabar sehingga Tugas Akhir ini dapat lebih baik.
4. Dr. Dra. Kartika Fithriasari, M.Si. selaku Kepala Departemen Statistika yang telah memberikan fasilitas, sarana, dan prasarana sehingga membantu kelancaran penyelesaian Tugas Akhir.
5. Dr. Agus Suharsono, M.S. selaku dosen wali selama masa studi yang telah banyak memberikan saran, arahan, dan semangat dalam menjalani perkuliahan.
6. Seluruh dosen Statistika ITS yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan yang sangat berharga, serta segenap karyawan Departemen Statistika ITS.
7. Aisah S.Si selaku pendamping TA yang telah banyak membimbing dan membantu selama melakukan penelitian dan mengumpulkan data penelitian sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan.

8. Partner dan teman-teman seperjuangan Wisuda 122 khususnya Rahma Metrikasari dan Khalimatus Sakdiyah yang saling memberikan banyak motivasi, bantuan, semangat hingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir bersama-sama.
9. Sahabat-sahabat penulis, Fitria Nur Aida, Ni Luh Putu Ika Candrawengi, Jessica Senira, Sheryn Dian Permata, Dora Isnaini Putri dan Aulia Sabila Husna yang selama ini telah membantu, mendukung, dan bersedia mendengarkan keluh kesah hiruk pikuk masa perkuliahan maupun curhatan pribadi penulis selama ini.
10. Teman-teman dan sahabat yang sudah memberikan semangat dan doa hingga saat ini.

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

LEMBAR PENGESAHAN v
ABSTRAK vii
ABSTRACT ix
KATA PENGANTAR xi
DAFTAR ISI xiii
DAFTAR GAMBAR xv
DAFTAR TABEL xvii
DAFTAR LAMPIRAN xix
DAFTAR NOTASI xixi
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 4
1.3 Tujuan Penelitian 4
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 Processes* 8
2.2 *Properties Spatial Point Process* 9
2.3 Studi Eksplorasi 10
2.4 Estimasi Parameter 12
2.5 Kebaikan Model 14
2.6 Gempabumi 15
2.7 Sesar Aktif 15
2.8 Zona Subduksi 16
2.9 Gunung Berapi 16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 19
3.1 Sumber Data 19
3.2 Variabel Penelitian 19

3.3 Langkah Analisis 21
3.4 Diagram Alir Penelitian 22
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN 25
4.1 Karakteristik Gempabumi di Sulawesi-Maluku 25
4.1.1 Perbandingan Gempabumi di Sulawesi-Maluku dengan Indonesia 25
4.1.2 Persebaran Gempabumi di Sulawesi-Maluku 26
4.1.3 Jarak Gempabumi dengan Sesar, Subduksi dan Gunung Api Terdekat 27
4.2 Pemodelan Gempabumi di Sulawesi-Maluku Menggunakan *Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Processes* 28
4.2.1 Uji *Chi-squared* 28
4.2.2 Pengujian Korelasi Spasial dengan Grafik *Inhomogeneous K-function* 29
4.2.3 Estimasi Parameter 30
4.2.4 Cek Kebaikan Model Menggunakan *Envelope K-function* 31
4.3 Prediksi Risiko Gempabumi di Sulawesi-Maluku 32
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 35
5.1 Kesimpulan 35
5.2 Saran dan Rekomendasi 36
DAFTAR PUSTAKA 37
LAMPIRAN 39
BIODATA PENULIS 39

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 1. 1. Gempabumi Utama dan Susulan di Kota Palu, Sulawesi Tengah Pada 28 September 2018.....2
Gambar 2. 1. Plot *envelope K-function* data Swedishpines 15
Gambar 3. 1. *Pixel Image* Jarak ke Sesar Aktif Terdekat (dalam 100 KM).....20
Gambar 3. 2. *Pixel Image* Jarak ke Subduksi Terdekat (dalam 100 KM).....20
Gambar 3. 3. *Pixel Image* Jarak ke Gunung Api Terdekat (dalam 100 KM).....21
Gambar 3. 4. Diagram Alir Penelitian. 23
Gambar 4. 1. Gempabumi di Sulawesi-Maluku Magnitudo ≥ 5 Pada Tahun 2009-2018. 26
Gambar 4. 2. Intensitas Gempabumi di Sulawesi-Maluku Magnitudo ≥ 5 Pada Tahun 2009-2018.....27
Gambar 4. 3. Pengujian Korelasi Spasial Data Spatial Point Pattern dengan Grafik Inhomogeneous *K-function*.....29
Gambar 4. 4. Cek Kebaikan Model dengan Menggunakan *Envelope K-function*.....32
Gambar 4. 5. Plot Prediksi Intensitas Gempabumi di Sulawesi-Maluku.....33
Gambar 4. 6. Pemetaan Wilayah dengan Risiko Gempabumi tinggi di Sulawesi-Maluku 33

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 3. 1. Variabel Penelitian 19
Tabel 4. 1 Gempabumi di Sulawesi-Maluku terhadap Indonesia 25
Tabel 4. 2. *Range* dan *Mean* Jarak Terdekat Gempabumi dengan Variabel Prediktor (dalam KM).....28
Tabel 4. 3. Estimasi Parameter dengan Menghilangkan Variabel yang Tidak Signifikan 30

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

Halaman

Lampiran 1. Gempabumi magnitudo lebih dari sama dengan 5 tahun 2009-2018 di Sulawesi-Maluku 39
Lampiran 2. *Syntax R* Input Data..... 40
Lampiran 3. *Syntax R* Karakteristik Data 41
Lampiran 4. *Syntax R* Mengubah Satuan Derajat Menjadi 100 KM 43
Lampiran 5. *Syntax R* Uji Homogenitas 44
Lampiran 6. *Syntax R* Cek Korelasi Spasial dengan Plot K-Function..... 44
Lampiran 7. *Syntax R* Fungsi Jarak Variabel Predikto r ke Gempabumi Terdekat..... 44
Lampiran 8. *Syntax R* Estimasi Parameter dengan *Thomas Process* dan *Second Order Composite Likelihood*..... 45
Lampiran 9. *Syntax R* Validasi Model dengan *Envelope K-Function* 45
Lampiran 10. *Syntax R* Prediksi Risiko Gempabumi Sulawesi-Maluku..... 45
Lampiran 11. *Output* Jarak Gempabumi ke Sesar, Subduksi dan Gunung Api Terdekat..... 46
Lampiran 12. *Output* Uji *Chi-Squared* 46
Lampiran 13. *Output* Model dengan 3 Variabel Prediktor..... 47
Lampiran 14. *Output* Estimasi Parameter dengan 2 Variabel Prediktor..... 50
Lampiran 15. Surat Pernyataan Data Sekunder..... 53

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR NOTASI

Notasi	Keterangan
W	*Observation window*
$\lvert W \rvert$	Luas area *observation window*
n	Jumlah titik gempabumi
u	Koordinat gempabumi
ρ	Fungsi Intensitas
$\boldsymbol{\beta}$	Parameter yang berkaitan dengan intensitas *(first order)*
$\boldsymbol{\theta}$	Parameter klaster yang terdiri dari κ dan ω
κ	Intensitas gempabumi utama *(mainshocks)*
ω	Standar deviasi sebaran gempabumi susulan *(aftershocks)* di sekitar gempabumi utama *(mainshocks)*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I
PENDAHULUAN

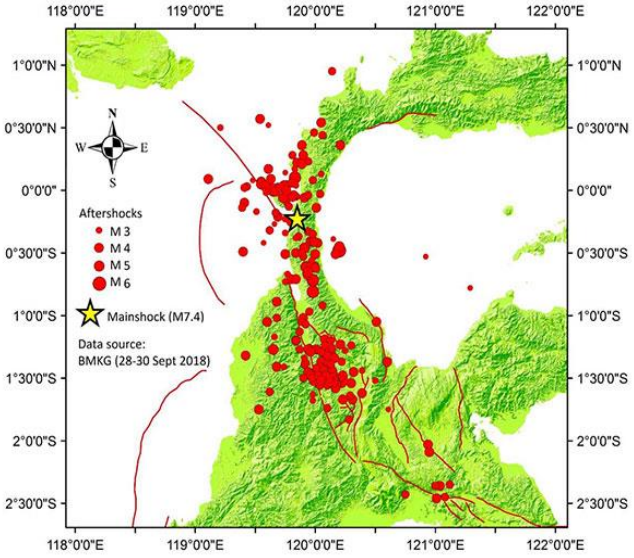
1.1 Latar Belakang

Indonesia dikelilingi oleh tiga lempeng besar dunia yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik (Bock et al., 2003). Hal ini menyebabkan Indonesia termasuk daerah kegempaan aktif dimana sepanjang tahun 2008-2018, Indonesia rata-rata mengalami gempabumi sebanyak 5000 hingga 6000 kali. Menurut Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG), kejadian gempabumi di Indonesia bahkan mengalami peningkatan dalam kurun waktu 5 tahun terakhir, yakni 4.234 kejadian pada tahun 2013, meningkat menjadi 6.929 kejadian pada tahun 2017 dan 11.577 kejadian pada tahun 2018.

Berdasarkan data kejadian gempabumi yang tercatat oleh BMKG, sebesar 48,5 % kejadian gempabumi di Indonesia terjadi di Pulau Sulawesi dan Maluku pada periode tahun 2009 hingga 2018. Hal ini mengindikasikan bahwa kejadian gempabumi di wilayah Sulawesi-Maluku tergolong tinggi. Tingginya gempabumi di wilayah Sulawesi-Maluku disebabkan oleh tatanan tektonik yang kompleks. Pertama, terdapat 48 sesar di Sulawesi-Maluku masih aktif bergerak (Pusat Penelitian dan Pengembangan PUPR, 2017) dan sering menghasilkan gempa. Kedua, terdapat penunjaman yang kompleks dan rumit pada pertemuan beberapa lempeng yang terjadi di bagian utara Pulau Sulawesi dan Kawasan Laut Maluku. Ketiga, terdapat subduksi ganda antara Lempeng Halmahera di sebelah timur dan Lempeng Mayu-Sangihe di sebelah barat. Peta seismitas di Sulawesi dan Maluku utara periode tahun 2009-2018 yang diterbitkan dalam katalog gempa signifikan yang diterbitkan oleh BMKG menunjukkan bahwa kejadian gempabumi di Sulawesi-Maluku sebagian besar terjadi pada kedalaman dangkal ($D \leq 60$ KM) yaitu sebesar 69 % Sehingga

menyebabkan getaran yang dirasakan di daratan semakin besar dan kerugian yang diakibatkan juga semakin besar.

Pola kejadian gempabumi dapat diteliti dan cenderung membentuk klaster, dimana gempabumi utama (*mainshocks*) sebagai induk klaster dan gempabumi susulan (*aftershocks*) sebagai anakannya. Pola gempabumi yang cenderung membentuk klaster dapat dilihat pada Gambar 1.1, tanda bintang menunjukkan gempabumi utama *(mainshocks)* sedangkan gempabumi susulan *(aftershocks)* ditunjukkan oleh titik-titik berwarna merah. Gambar 1.1 merupakan kejadian gempabumi di Palu, Sulawesi Tengah dengan magnitudo 7,4. Selain memiliki magnitudo yang besar, gempa ini disusul oleh tsunami sehingga menyebabkan kerugian mencapai Rp13,82 triliun dan korban meninggal 2.256 orang (*BNPB*, 2018).



Gambar 1. 1. Gempabumi Utama dan Susulan di Kota Palu, Sulawesi Tengah Pada 28 September 2018.
Sumber: (LIPI, 2018).

Di Indonesia, pemutakhiran sumber dan peta gempa Indonesia sudah dilakukan oleh Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB). Peta risiko gempa yang dibuat oleh BNPB sudah informatif dan mudah untuk diakses oleh masyarakat umum melalui *web* BNPB. Namun demikian, belum terdapat penelitian gempabumi yang melibatkan faktor spasial sebagai variabel prediktor seperti zona subduksi, sesar dan keberadaan gunung berapi.

Penelitian mengenai gempabumi pernah dilakukan pada kasus kegempaan di Yunani pada tahun 2005 hingga 2014 dengan magnitudo lebih besar atau sama dengan 4 menggunakan *hybrid model*. Variabel jarak terdekat ke gunung berapi tidak berpengaruh secara signifikan. Sedangkan jarak ke lokasi zona subduksi dan jarak terdekat ke sesar berpengaruh secara signifikan. Semakin jauh jarak dari zona subduksi dan sesar, maka intensitas gempabumi akan semakin berkurang (Siino et al., 2017). Penelitian lainnya yaitu gempabumi di Pakistan pada tahun 1973 hingga 2008 dengan magnitudo gempa dibagi menjadi 2 yaitu gempa besar dengan magnitudo lebih dari 5,4 serta gempa kecil dengan magnitudo antara 4 hingga 5,4 menggunakan *Gibbs model*. Variabel sesar dan subduksi berpengaruh secara signifikan (Anwar et al., 2012). Selain kedua penelitian tersebut, D. Vere-jones pernah melakukan penelitian gempabumi di Selandia Baru. Model yang digunakan adalah model klaster dari *Neyman-Scott* dan *Bartlett-Lewis.* Hasil penelitian menunjukkan bahwa gempabumi dengan guncangan kecil sering mengikuti terjadinya gempabumi dangkal yang besar dan gempa dangkal dimodelkan dengan baik menggunakan *Neyman-Scott* (Vere-Jones, 1970).

Berdasarkan beberapa penelitian sebelumnya yang juga melibatkan informasi geologi sebagai variabel penjelas serta urgensi bencana gempabumi di Sulawesi-Maluku, maka akan dilakukan penelitian gempabumi di Sulawesi-Maluku. Magnitudo gempa lebih dari atau sama dengan 5 yang akan diamati karena menurut BMKG, gempabumi tersebut termasuk gempabumi merusak (Sunarjo et al., 2012). Selain itu, menurut Peter (1965)

indeks seismitas dengan magnitudo yang lebih besar atau sama dengan 5 menggambarkan total kejadian gempabumi rata-rata pertahun (Peter, 1965). Penelitian ini akan menganalisis gempabumi di Sulawesi-Maluku dengan dua fokus. Pertama, memperhatikan efek klaster akibat aktivitas gempabumi utama (*mainshocks)* dan susulan (*aftershocks*). Kedua, melibatkan zona subduksi, sesar dan keberadaan gunung berapi untuk mengukur efeknya terhadap kejadian gempabumi terdekat. Penelitian dilakukan menggunakan model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Processes* (NSCP). Hasil pemodelan tersebut kemudian dijadikan sebagai basis penyusunan peta risiko gempabumi di Sulawesi-Maluku.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang maka didefinisikan rumusan masalah sebagai berikut.

1. Bagaimana karakteristik persebaran gempabumi di Sulawesi-Maluku?
2. Bagaimana pemodelan gempabumi di Sulawesi-Maluku menggunakan model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Processes*?
3. Bagaimana pemetaan hasil prediksi risiko gempabumi di Sulawesi-Maluku?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang akan diselesaikan maka tujuan penelitian yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui karakteristik persebaran gempabumi di wilayah Sulawesi-Maluku.
2. Memodelkan gempabumi di Sulawesi-Maluku menggunakan model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Processes.*
3. Memetakan hasil prediksi risiko gempabumi di wilayah Sulawesi-Maluku.

1.4 Manfaat Penelitian

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

1. Hasil penelitian diharapkan menjadi bahan pertimbangan bagi pembuat kebijakan dalam membuat rencana antisipasi dan mitigasi bencana gempabumi khususnya di wilayah Sulawesi-Maluku.
2. Memberikan informasi bagi masyarakat khususnya warga Sulawesi-Maluku yang berada pada wilayah yang diprediksi akan terjadi gempa agar selalu waspada.
3. Memberikan wawasan keilmuan mengenai metode statistik, khususnya *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Processes (NSCP)* serta aplikasinya dalam kasus gempabumi yang terjadi di wilayah Sulawesi-Maluku.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini yaitu data yang digunakan merupakan data kejadian gempabumi di wilayah Sulawesi-Maluku tahun 2009-2018 dengan magnitudo yang lebih besar atau sama dengan 5.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

Bagian ini akan membahas beberapa kajian pustaka yang digunakan dalam penyelesaian masalah terkait analisis risiko gempabumi di Sulawesi-Maluku.

2.1 *Spatial Point Process*

Spatial point process adalah pola acak titik-titik dalam ruang 2-dimensi yang berguna sebagai model statistik pola titik yang diamati, di mana titik-titik tersebut mewakili lokasi beberapa objek penelitian atau dengan kata lain merupakan suatu mekanisme random atau acak yang menghasilkan suatu pola titik *(point patterns).* Korelasi spasial dalam pola titik *(point patterns)* terbagi menjadi 3 pola dasar yaitu sebagai berikut (Baddeley et al., 2015).

1. Pola Independen *(independent)* yaitu ketika titik-titik dalam *unit square* menunjukkan pola acak *(complete spatial randomness).*
2. Pola umum *(regular)* yaitu ketika titik-titik cenderung menghindar satu sama lain atau menyebar dalam *unit square.*
3. Pola membentuk kelompok *(clustered)* yaitu ketika titik-titik dalam *unit squared* cenderung mengelompok.

2.1.1 *Poisson Process*

Suatu *Poisson Process* $\mathbf{X}$ pada $\mathbb{R}^2$ dengan fungsi intensitas ρ dan *observation window* $W \subseteq \mathbb{R}^2$, maka :

1. $N(W)$ atau jumlah titik di W berdistribusi *Poisson* dengan *mean* $\mu(W)$
2. Poin di $\mathbf{X}_W$ merupakan independen dengan fungsi intensitas $\rho(u)$, $u \in W$

Jika $\rho(u)$ konstan untuk semua $u \in \mathbb{R}^2$ maka *Poisson process* homogen (Waagepetersen, 2006).

2.1.2 *Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Processes*

Poisson process yang memiliki nilai *intensity* yang random atau acak adalah *Cox processes*. Penelitian ini termasuk dalam *cox process* karena rata-rata jumlah titik atau lokasi kejadian gempabumi di wilayah Sulawesi-Maluku merupakan jumlah yang random atau acak. Terdapat beberapa tipe *Cox processes*, salah satunya adalah *Neyman-Scott point processes*. Misalkan $\mathbf{C}$ merupakan *Poisson process* (*mother process)* dengan intensitas $\kappa > 0$. $\mathbf{X}_c, c \in \mathbf{C}$ merupakan *Poisson process* yang independen (*offspring processes)* dengan fungsi intensitas sebagai berikut.

$$\rho_c(u;\boldsymbol{\beta}) = \exp(\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{z}(u))\, f(u-c;\omega) \tag{2.1}$$

dimana f adalah fungsi kepadatan peluang (PDF) dari distribusi jarak antara *offspring* dan *mother* proses dengan parameter ω. Induk poin *(mother points)* dalam penelitian ini adalah lokasi terjadinya gempabumi utama *(mainshocks)* sedangkan lokasi terjadinya gempabumi susulan *(aftershocks)* sebagai *offspring points*. Maka,fungsi intensitas *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Processes* dapat ditulis pada persamaan berikut.

$$\rho(u;\boldsymbol{\beta}) = \kappa \exp(\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{z}(u)) \tag{2.2}$$

fungsi densitas f dari *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Processes* dapat dilihat pada rumus berikut.

$$f(u) = (2\pi\omega^2)^{-1} \exp(-\|u\|^2 / (2\omega^2)) \tag{2.3}$$

pada Thomas *Process*, fungsi kepadatan peluang jarak antara *mother* dan *offspring process* saling independen dan berdistribusi normal $N(0, \sigma^2\mathbf{I})$ (Choiruddin et al., 2018).

Adapun rumus *pair correlation function* dari Thomas *process* yang merupakan turunan dari bentuk umum *pair correlation function* pada persamaan 2.8 adalah sebagai berikut.

$$g(u) = 1 + (4\pi\omega^2)^{-1} \exp(-\|u\|^2 / (4\omega^2)) / \kappa \tag{2.4}$$

2.2 *Properties Spatial Point Process*

Spatial point patterns merupakan hasil gabungan dari *first order* 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*

First order properties dari *spatial point patterns* dideskripsikan oleh intensitas *(intensity).* Intensitas merupakan ekspektasi jumlah poin atau titik setiap *unit area*. Ekspektasi jumlah poin yang diamati pada *observation window* W, dapat ditulis sebagai berikut.

$$\mu(W) = E(N(W)), \ W \subseteq \mathbb{R}^2 \tag{2.5}$$

First order merupakan fungsi non negatif dari intensity ρ yang ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$\mu(W) = \int_W \rho(u; \boldsymbol{\beta}) \, du \tag{2.6}$$

dimana $\rho(u; \boldsymbol{\beta})$ adalah peluang megobservasi sebuah poin di area yang sangat kecil dengan luas du dan pusat u (Baddeley et al., 2015).

2.2.2 *Second Order Properties*

Second order properties dalam *point patterns* adalah interaksi antar poin yang mendeskripsikan *stochastic dependence* antar poin. Adapun *second order properties* yang dibahas pada subbab ini adalah bentuk umum dari *pair correlation function* atau fungsi korelasi berpasangan. Fungsi korelasi berpasangan atau $g(r)$ melihat kontribusi dari jarak antar titik yang sama dengan r.

Berikut merupakan rumus *second order moment* (Baddeley et al., 2015).

$$\alpha^{(2)}(C) = \int_C \int \mathbf{1}(u, v \in C)\rho^{(2)}(u, v, \boldsymbol{\theta})dudv \tag{2.7}$$

$\rho^{(2)}$ merupakan peluang mengobservasi dua titik (sepasang) di dua lokasi yang sangat kecil dengan pusat u dan v dengan volume du dan dv. Maka diperoleh bentuk umum dari *pair correlation function* $g(u, v, \boldsymbol{\theta})$ yang dijabarkan pada persamaan 2.8 dengan $\boldsymbol{\theta}$ merupakan parameter klaster yang terdiri dari κ dan ω.

$$g(u, v, \boldsymbol{\theta}) = \frac{\rho^{(2)}(u, v, \boldsymbol{\theta})}{\rho(u, \beta)\rho(v, \beta)} \tag{2.8}$$

2.3 Studi Eksplorasi

Studi eksplorasi dalam penelitian ini dilakukan dengan cara menguji homogenitas dari data poin atau titik dengan menggunakan uji *chi-squared.* Selain itu, untuk mengetahui korelasi spasial dari data maka dilakukan analisis menggunakan *K-Function*.

2.3.1 Uji *Chi-squared*

Uji *chi-squared* dalam penelitian ini akan digunakan untuk menguji homogenitas dari data. *Observation window* (W) dibagi menjadi beberapa kotak bagian yaitu $B_1, ..., B_m$ dimana $n_1, ..., n_m$ merupakan jumlah poin disetiap kotak bagian. Berikut merupakan rumus dari uji *Chi-squared* (Baddeley et al., 2015). Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut.

H_0 : Data mengikuti pola yang stasioner

H_1 : Data mengikuti pola yang tidak stasioner

$$\chi^2_{hit} = \sum_{j=1}^{m} \left(\frac{n_j - e}{e} \right)^2 \tag{2.9}$$

Keterangan :

n_j : jumlah poin atau titik di *quadrat count* ke-*j*

m : jumlah *quadrat count*

e : Ekspektasi banyaknya poin atau titik di *quadrat count*

Hasil pengujian akan memutuskan tolak hipotesis nol (H_0) apabila nilai $\chi^2_{hit} > \chi^2_{tabel}$ atau nilai *p-value* kurang dari 0,05.

2.3.2 *K-Function*

Konsep dari *K-function* $\hat{K}(r)$ adalah menghitung jarak antar semua pasangan titik berbeda u_i dan u_j dan merupakan jumlah rata-rata kumulatif dari jarak antar poin yang kurang dari atau sama dengan nilai r. Nilai r merupakan nilai jarak dengan $r \geq 0$. Apabila pola titik cenderung membentuk kelompok *(clustered)* maka jarak antar pasang titik akan semakin kecil, dengan kata lain jarak antar titik yang kurang dari atau sama dengan nilai r akan semakin banyak. Sedangkan, ketika pola titik cenderung reguler maka jarak antar pasang titik akan semakin besar sehingga jarak antar titik yang kurang dari atau sama dengan nilai r akan semakin sedikit. Berikut merupakan rumus empiris dari *K-function* dengan asumsi bahwa intensitas homogen (Baddeley et al., 2015).

$$\hat{K}(r) = \frac{|W|}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \mathbf{1}\left\{d_{ij} \leq r\right\} h_{ij}(r) \qquad (2.10)$$

Keterangan :

$|W|$: luas *area observation window*

n : jumlah poin

d_{ij} : jarak antar pasang poin

h_{ij} : *edge correction*

Apabila intensitas inhomogen, maka ditambahkan bobot sebesar $b_i = 1/\rho(u_i)$ yang merupakan intensitas proporsional pada poin u_i sedangkan pasangan u_i dan u_j akan ditambahkan bobot sebesar $b_{ij} = b_i b_j = 1/\rho(u_i)\rho(u_j)$. Maka rumus *inhomogen K-function* adalah sebagai berikut

$$\hat{K}_{\text{inhom}}(r) = \frac{1}{|W|}\sum_i \sum_{j \neq i} \frac{\mathbf{1}\left\{\left\|u_i - u_j\right\| \leq r\right\}}{\hat{\rho}(u_i)\hat{\rho}(u_j)} h(u_i, u_j; r) \qquad (2.11)$$

Keterangan :

$h(x_i, x_j; r)$: bobot *edge correction*

$|W|$: luas *area observation window*

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

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

2.4 Estimasi Parameter

Pada penelitian ini, estimasi parameter yang digunakan adalah *Berman-Turner Approximation* dan *second-order composite likelihood*.

2.4.1 *Berman-Turner*

Berman-Turner mengembangkan metode untuk menyederhanakan estimasi *maximum likelihood inhomogeneous Poisson point process* agar sama dengan *likelihood* dari regresi Poisson. Fungsi likelihood untuk mengestimasi $\boldsymbol{\beta}$ dapat dilihat pada persamaan berikut (Baddeley et al., 2015).

$$L\left(\boldsymbol{\beta}\right) = L\left(\boldsymbol{\beta}; \mathbf{u}\right) = \rho(\boldsymbol{\beta}; u_1)\rho(\boldsymbol{\beta}; u_2)...\rho(\boldsymbol{\beta}; u_n) \exp\left(\int_W (1 - \rho(u; \boldsymbol{\beta}))du\right) \qquad (2.12)$$

Bentuk *log-likelihood* nya dapat dilihat pada persamaan 2.13

$$\log L(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^{n} \log \rho(\boldsymbol{\beta}; u_i) - \int_W \rho(u; \boldsymbol{\beta}) du \tag{2.13}$$

Menggunakan metode yang dikembangkan oleh Berman dan Turner yaitu pendekatan *numerical quadrature*, maka $\int_W \rho(u) du$ dapat didekati oleh $\sum_{i=1}^{n+d} \rho(u_i; \boldsymbol{\beta}) w_i$ yang mana d merupakan banyaknya *dummy point*. Kemudian persamaan 2.13 dapat ditulis menjadi persamaan 2.14

$$\log L(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^{n} \log \rho(\boldsymbol{\beta}; u_i) - \sum_{i=1}^{n+d} \rho(u_i; \boldsymbol{\beta}) w_i \tag{2.14}$$

Berikut merupakan bentuk sederhana dari persamaan 2.14

$$\log L(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^{n+d} (I_i \log \rho(u_i; \boldsymbol{\beta}) - \rho(u_i; \boldsymbol{\beta}) w_i) \tag{2.15}$$

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

Adapun bentuk likelihood dari regresi Poisson dapat dilihat pada persamaan 2.16

$$\log L(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^{n} (y_i \boldsymbol{\beta}^T u_i - \exp\left(\boldsymbol{\beta}^T u_i\right) - \log(y!)) \tag{2.16}$$

dengan $y_i = \dfrac{I_i}{w_i}$ dimana $y_i \sim$ *weighted poisson regression* , maka persamaan 2.16 menjadi

$$\log L(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^{n} \left(y_i \boldsymbol{\beta}^T u_i - \exp\left(\boldsymbol{\beta}^T u_i\right)\right) \tag{2.17}$$

2.4.2 *Second-Order Composite Likelihood*

Second-Order Composite Likelihood merupakan salah satu estimasi parameter untuk mendapatkan model dari *clustered point process.* Berikut merupakan fungsi log *Composite Likelihood* dimana $\boldsymbol{\theta}$ merupakan estimasi parameter dari ω dan κ

$$\log CL(\boldsymbol{\theta}) = \sum_i \sum_{j \neq i} w(u_i, u_j) \left[\log \rho^{(2)}(u_i, u_j; \boldsymbol{\theta}) - \log \int \int_{ww} w(u_i, u_j) \rho^{(2)}(u_i, u_j; \boldsymbol{\theta}) du_i dv_j \right] \quad (2.18)$$

nilai w merupakan fungsi bobot, untuk memudahkan perhitungan maka $w(u_i, u_j) = \mathbf{1}\left\{ \left\| u_i - u_j \right\| \leq R \right\}$ dengan $R > 0$ merupakan batas atas jarak korelasi dari model. Berikut merupakan fungsi *composite score.*

$$\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\theta}} \log CL(\boldsymbol{\theta}) = \sum_i \sum_{j \neq i} w(u_i, u_j) \frac{k_2(u_i, u_j; \boldsymbol{\theta})}{\rho^{(2)}(u_i, u_j; \boldsymbol{\theta})} - \sum_i \sum_j w(u_i, u_j) \frac{(k_2, w)}{(\rho^{(2)}, w)} \quad (2.19)$$

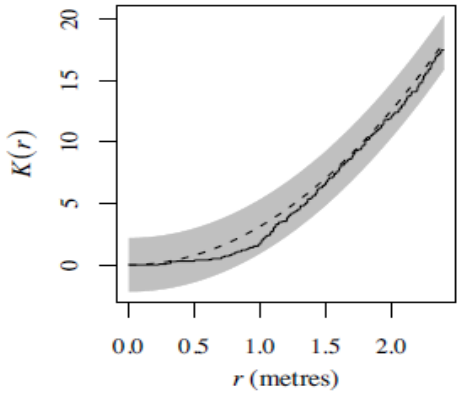
$$\kappa_2(u_i, u_j; \boldsymbol{\theta}) = \frac{\partial}{\left(\partial \boldsymbol{\theta}\right) \rho^{(2)}(u_i, u_j; \boldsymbol{\theta})} \quad (2.20)$$

$$(l, w) = \int \int_{w\,w} w(u_i, u_j) l(u_i, u_j; \boldsymbol{\theta}) du_i du_j \quad (2.21)$$

untuk setiap *integrand* $l(u_i, u_j; \boldsymbol{\theta})$.Estimasi parameter *second-order composite likelihood* dapat diaplikasikan pada *package spatstat* dengan menggunakan *Software R* menggunakan fungsi kppm (Baddeley et al., 2015).

2.5 Kebaikan Model

Pada penlitian ini, pengecekan kebaikan model menggunakan *envelope K-function.* Hasil dari model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Processes* akan dibandingkan dengan plot *K-function* data poin. Model dapat dikatakan baik apabila plot *K-function* dari data poin berada pada interval *envelope K-function.* Pada Gambar 2.1, interval *envelope K-function* diwakili oleh batas atas dan batas bawah dari area yang berwarna abu-abu. Berikut merupakan contoh visualisasi plot *envelope K-function* data *Swedishpines* (Baddeley et al., 2015).



Gambar 2. 1. *Plot envelope K-function* data Swedishpines

2.6 Gempabumi

Gempabumi adalah peristiwa bergetarnya bumi karena pergerakan atau pergeseran lapisan batuan pada kulit bumi secara tiba-tiba. Berdasarkan penyebabnya, gempa bumi dikelompokkan menjadi 5 macam yaitu gempabumi tektonik, vulkanik, runtuhan, jatuhan meteor, dan gempabumi 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 serta dapat dipicu oleh aktivitas gempabumi tektonik. Gempabumi runtuhan adalah gempabumi yang terjadi ketika suatu gua atau lokasi pertambangan runtuh. Gempabumi yang disebabkan oleh manusia adalah peledakan dinamit, nuklir, ledakan bom dan lain sebagainya (Sunarjo et al., 2012).

2.7 Sesar Aktif

Sesar atau patahan *(fault)* merupakan bidang batas antara dua fraksi kulit bumi yang mengalami gerakan relatif, biasanya merupakan daerah yang relatif lemah, mengalami retakan atau terdapat celah. Sesar yang dijadikan variabel prediktor dalam penelitian ini adalah sesar aktif di wilayah Sulawesi-Maluku.

Terdapat 3 jenis sesar (Sunarjo et al., 2012), dengan rincian sebagai berikut.

1) Sesar normal terjadi apabila batuan yang menumpu merosot ke bawah akibat batuan penumpu di kedua sisinya bergerak saling menjauh.
2) Sesar naik terjadi apabila batuan yang menumpu terangkat ke atas akibat batuan penumpu di kedua sisinya bergerak saling mendorong.
3) Sesar geser terjadi apabila kedua batuan pada sesar bergerak saling menggeser atau menggelangsar.

Wilayah Sulawesi-Maluku didominasi oleh sesar naik. Berdasarkan buku Pusat Studi Gempa Nasional Tahun 2017, terdapat 48 sesar aktif di wilayah Sulawesi-Maluku.

2.8 Zona Subduksi

Zona Subduksi merupakan daerah hasil dari pertemuan antar dua lempeng. Zona subduksi di wilayah Sulawesi-Maluku telah diidentifikasi keberadaannya di sekitar Halmahera dan utara Sulawesi. Setidaknya gempa magnitudo 7,1 telah terjadi di zona subduksi Sangihe pada tahun 2014 (Retnowati et al., 2017). Adapun sebaran gempabumi di wilayah Sulawesi-Maluku mengelompok di bagian subduksi utara Sulawesi dimana daerah Laut Maluku merupakan zona tumbukan antara dua buah subduksi yang saling berhadapan. Daerah ini berada dalam zona kompleks interaksi Lempeng Pasifik, Lempeng Filipina, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Australia.

2.9 Gunung Berapi

Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia (ESDM), gunung api adalah lubang kepundan atau rekahan dalam kerak bumi tempat keluarnya cairan magma atau gas atau cairan lainnya ke permukaan bumi. Pengetahuan tentang tektonik lempeng merupakan pemecahan awal dari teka-teki fenomena alam termasuk deretan pegunungan, benua, gempabumi dan gunung api.Planet bumi memiliki banyak cairan

dan air di permukaan. Kedua faktor tersebut sangat mempengaruhi pembentukan dan komposisi magma serta lokasi dan kejadian gunung api. Terbentuknya gunung api berhubungan dengan pergerakan antar lempeng. Pergerakan antar lempeng ini menimbulkan empat bususr gunung api yang berbeda yaitu sebagai berikut (*Ministry of energy and mineral resources*, 2012).

1. Pemekaran kerak benua, lempeng bergerak saling menjauh sehingga memberikan kesempatan magma bergerak ke permukaan, kemudian membentuk busur gunung api tengah Samudra
2. Tumbukan antar kerak, dimana kerak samudera menunjam di bawah kerak benua. Akibat gesekan antar kerak tersebut, terjadi peleburan batuan dan lelehan batuan yang bergerak ke permukaan melalui rekahan kemudian membentuk busur gunung api di tepi benua.
3. Kerak benua menjauh satu sama lain secara horizontal, sehingga menimnulkan rekahan atau patahan. Patahan atau rekahahan tersebut menjadi jalan ke permukaan lelehan batuan atau magma sehingga membentuk busur gunung api tengah benua atau banjiran lava sepanjang rekahan.

Penipisan kerak samudera akibat pergerakan lempeng memberikan kesempatan bagi magma menerobos ke dasar samudera, terobosan magma ini merupakan banjir lava yang membentuk deretan gunung api perisai.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Sumber Data

Data Penelitian diambil pada *website* Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) dengan mengambil data kejadian gempabumi dengan magnitudo gempa lebih dari atau sama dengan 5 di Sulawesi-Maluku selama 10 tahun yaitu tahun 2009-2018. Data gunung api diambil dari *website* Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), data sesar dan subduksi diambil dari Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. *Observation window* pada penelitian ini yaitu $W = [130.98,\ 150.96]\ x\ [-8.325,\ 6.327]\ (100\ \text{km})^2$.

3.2 Variabel Penelitian

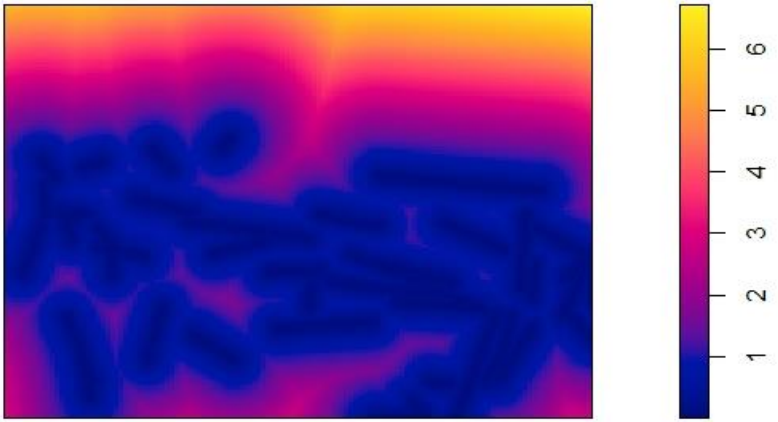
Variabel penelitian yang digunakan dalam penelitian ini dijelaskan pada Tabel 3.1 sebagai berikut.

Tabel 3. 1. Variabel Penelitian

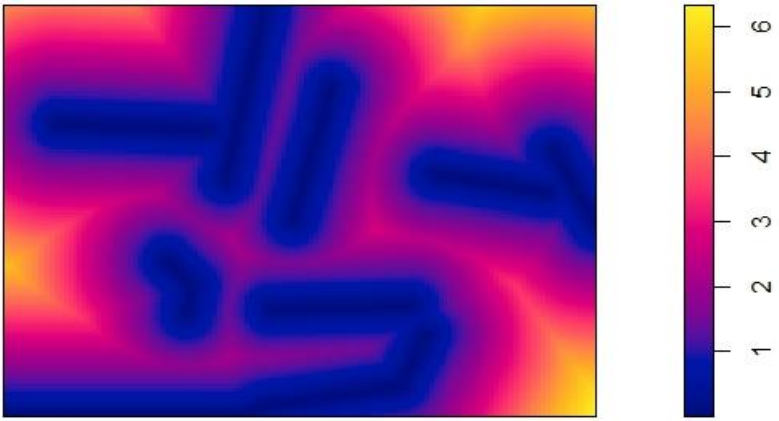
Variabel	Definisi	Satuan
y	Koordinat lintang *(latitude)* dan bujur *(longitude)* lokasi terjadinya gempabumi di Sulawesi-Maluku	Derajat koordinat
x_1	Koordinat lintang *(latitude)* dan bujur *(longitude)* sesar aktif di Sulawesi-Maluku	Derajat koordinat
x_2	Koordinat lintang *(latitude)* dan bujur *(longitude)* subduksi di Sulawesi-Maluku	Derajat koordinat
x_3	Koordinat lintang *(latitude)* dan bujur *(longitude)* gunung api di Sulawesi-Maluku	Derajat koordinat

Struktur data yang digunakan dalam penelitian ini dijelaskan dalam bentuk *pixel image* sehingga antar data tidak terkesan independen melainkan terdapat pengaruh spasial atau lokasi. *Pixel image* berikut menjelaskan bahwa jika warna semakin cerah yaitu mendekati warna kekuningan, maka jarak lokasi

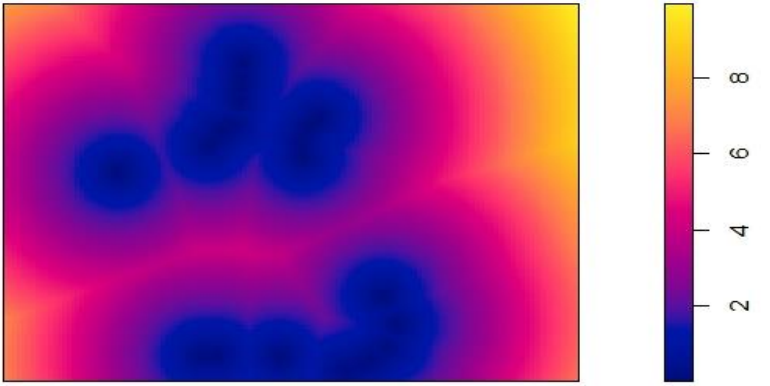
gempabumi ke variabel prediktor semakin besar. Jarak gempabumi ke sesar aktif terdekat, subduksi terdekat dan gunung api terdekat masing-masing dijelaskan pada Gambar 3.1-3.3.



Gambar 3. 1. *Pixel Image* Jarak ke Sesar Aktif Terdekat (dalam 100 KM)



Gambar 3. 2. *Pixel Image* Jarak ke Subduksi Terdekat (dalam 100 KM)



Gambar 3. 3. *Pixel Image* Jarak ke Gunung Api Terdekat (dalam 100 KM)

3.3 Langkah Analisis

Adapun langkah analisis yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menentukan batas *observation window* wilayah Sulawesi-Maluku yang akan diamati.
2. Menentukan jarak lokasi gempabumi ke sesar terdekat, subduksi terdekat dan gunung api terdekat.
3. Menghitung jarak lokasi gempabumi ke sesar terdekat, subduksi terdekat dan gunung api terdekat.
4. Melakukan visualisasi pada data gempabumi, sesar aktif, zona subduksi, dan gunung api dengan menggunakan *Software R* dengan *package spatstat* untuk mengetahui gambaran umum dari data yang akan diamati.
5. Melakukan analisis eksplorasi data dengan langkah sebagai berikut.

a. Melakukan identifikasi stasioneritas dari data dengan menggunakan uji *Chi-squared.*

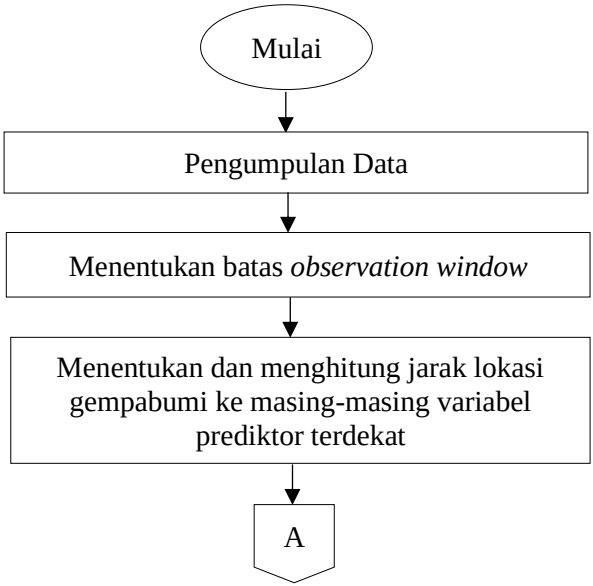
b. Jika hasil uji *Chi-squared* menunjukkan data *inhomogen,* maka dilakukan identifikasi secara visual dengan

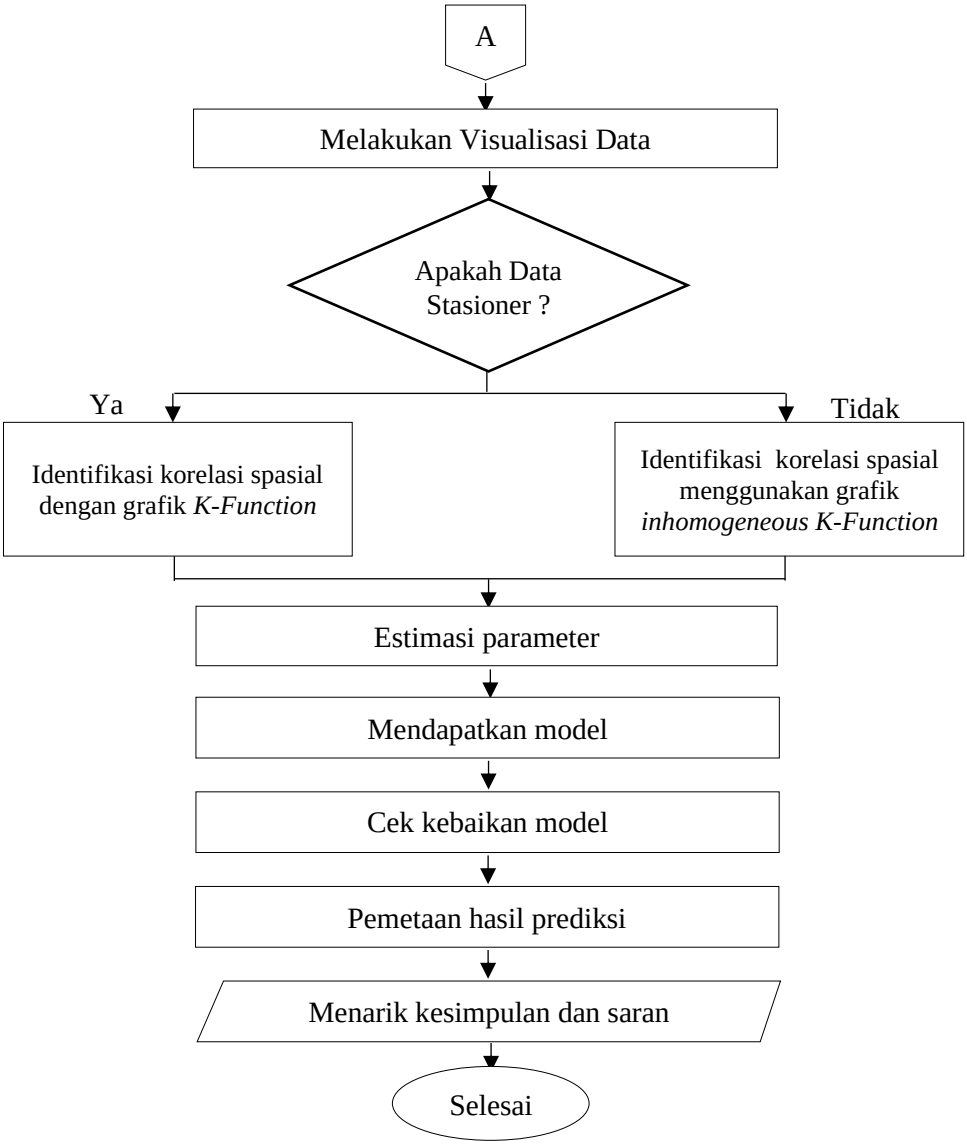
menggunakan grafik *inhomogen K-function* untuk mengetahui korelasi spasial data.

6. Estimasi parameter dilakukan dengan menggunakan *Berman-Turner* dan *Second-Order Composite Likelihood.*
7. Mendapatkan model untuk memprediksi terjadinya gempabumi di Sulawesi-Maluku.
8. Pengecekan kebaikan model dengan menggunakan *envelope K-function.*
9. Melakukan pemetaan hasil prediksi terjadinya gempabumi di Sulawesi-Maluku.
10. Menarik kesimpulan dan saran.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir digunakan untuk lebih memperjelas langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian. Berikut merupakan diagram alir yang digunakan pada penelitian ini.





Gambar 3. 4. Diagram Alir Penelitian.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Karakteristik gempabumi di Sulawesi-Maluku berikut ini akan dideskripsikan oleh lokasi terjadinya gempabumi berdasarkan faktor-faktor yang diduga berpengaruh seperti jarak terdekat gempabumi ke sesar aktif, subduksi, dan gunung api. Setelahnya, akan dilakukan analisis dengan beberapa tahap, mulai dari eksplorasi data lokasi gempabumi, sesar aktif, subduksi dan gunung api serta identifikasi stasioneritas dengan menggunakan uji *Chi-squared*. Grafik *inhomogen K-function* untuk mengetahui korelasi spasial data, pemodelan menggunakan menggunakan model *Neyman-Scott Cox Processes*.

4.1 Karakteristik Gempabumi di Sulawesi-Maluku

Karakteristik gempabumi di Sulawesi-Maluku pada penelitian ini dibagi menjadi tiga. Pertama, membandingkan gempabumi yang terjadi di Sulawesi-Maluku dengan Indonesia. Kedua, eksplorasi data lokasi gempabumi, sesar aktif, subduksi dan gunung api berdasarkan letak koordinat. Ketiga, eksplorasi jarak gempabumi dengan sesar, subduksi dan gunung api terdekat.

4.1.1 Perbandingan Gempabumi di Sulawesi-Maluku dengan Indonesia

Gempabumi di setiap wilayah yang terjadi di Indonesia memiliki tingkat kerawanan yang berbeda-beda jika dilihat dari jumlah kejadiannya. Perbandingan kejadian gempabumi di Sulawesi-Maluku dengan Indonesia yang terjadi pada tahun 2009-2018 dapat dijelaskan pada Tabel 4.1.

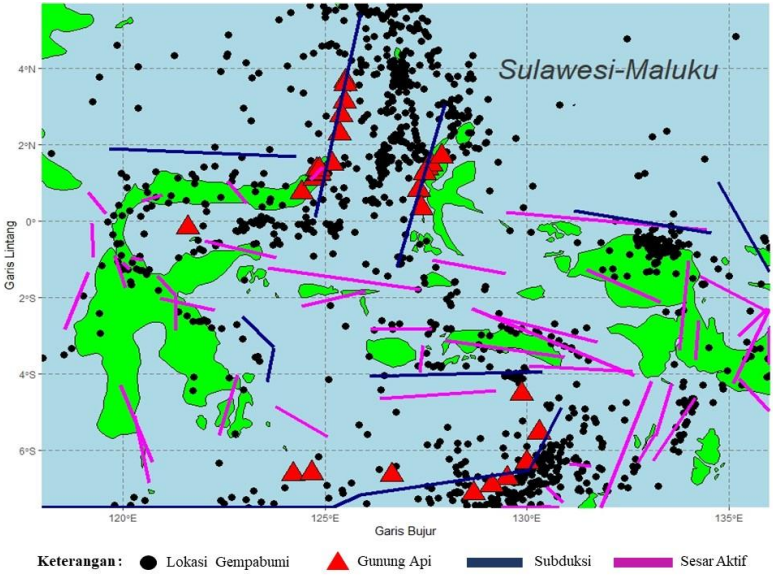
Tabel 4. 1. Jumlah Kejadian Gempabumi di Sulawesi-Maluku terhadap Indonesia

Wilayah	Magnitudo	Jumlah Gempabumi
Indonesia	Semua Magnitudo	47.390
	≥ 5	2.002
Sulawesi-Maluku	Semua Magnitudo	22.975
	≥ 5	1.081

Berdasarkan Tabel 4.1 diketahui bahwa kejadian gempabumi tahun 2009-2018 di Indonesia mencapai angka 47.390 dimana sebesar 48,5% gempabumi terjadi di wilayah Sulawesi-Maluku. Tak hanya itu, sebesar 54% gempabumi dengan magnitudo lebih dari atau sama dengan 5 terjadi di Sulawesi-Maluku. Artinya, setengah dari kejadian gempabumi di Indonesia terjadi di Sulawesi-Maluku.

4.1.2 Persebaran Gempabumi di Sulawesi-Maluku

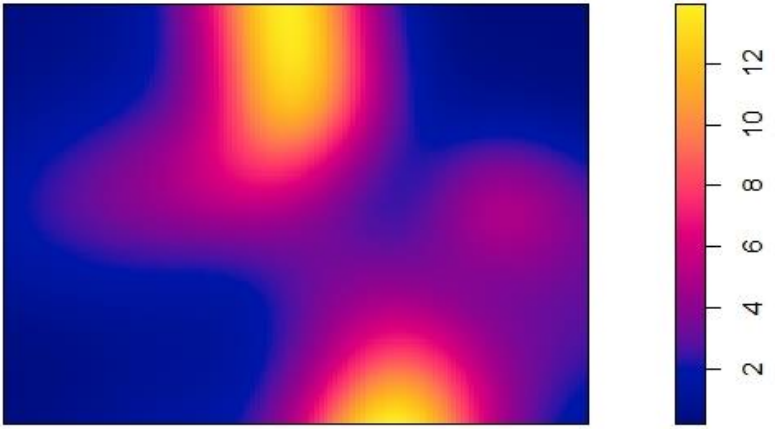
Karakteristik persebaran gempabumi di Sulawesi-Maluku berdasarkan letak koordinat terjadinya gempabumi, sesar aktif, subduksi dan gunung api dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1. Gempabumi di Sulawesi-Maluku Magnitudo ≥ 5 Pada Tahun 2009-2018.

Pada Gambar 4.1, titik-titik atau bulatan berwarna hitam merupakan titik lokasi terjadinya gempabumi. Garis berwarna ungu muda merupakan sesar aktif, garis berwarna biru tua merupakan subduksi dan segitiga berwarna merah merupakan

lokasi gunung api. Secara visual, lokasi subduksi dan gunung api cenderung terletak di bagian selatan dan utara wilayah Sulawesi-Maluku. Sedangkan lokasi sesar aktif menyebar dari timur hingga barat dan cenderung lebih banyak terdapat di bagian timur wilayah Sulawesi-Maluku.



Gambar 4. 2. Intensitas Gempabumi di Sulawesi-Maluku Magnitudo ≥ 5 Pada Tahun 2009-2018.

Gambar 4.2 merupakan intensitas gempabumi di Sulawesi-Maluku magnitudo ≥ 5 pada tahun 2009-2018. Semakin mendekati warna kekuningan, maka intensitas gempabumi yang terjadi semakin tinggi. Sebaliknya, semakin mendekati warna biru tua, maka intensitas gempabumi di wilayah tersebut semakin rendah. Terlihat bahwa intensitas gempabumi di Sulawesi-Maluku cenderung tinggi di bagian utara dan selatan.

4.1.3 Jarak Gempabumi dengan Sesar, Subduksi dan Gunung Api Terdekat

Penelitian melibatkan sesar, subduksi dan keberadaan gunung berapi untuk mengukur efeknya terhadap kejadian gempabumi terdekat. Secara visual, jarak gempabumi dengan sesar, subduksi dan gunung api dapat dilihat masing-masing pada

Gambar 3.1, 3.2 dan 3.3. Adapun data yang digunakan untuk analisis merupakan jarak terdekat masing-masing variabel prediktor yaitu sesar, subduksi dan gunung api dengan *range* dan *mean* yang dijabarkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2. *Range* dan *Mean* Jarak Terdekat Gempabumi dengan Variabel Prediktor (dalam KM)

Variabel	*Range*	*Mean*
Sesar	[0,012; 672,322]	161,693
Subduksi	[0,014; 633,152]	175,859
Gunung Api	[2,721; 1.004,501]	337,937

Range jarak terdekat gempabumi ke sesar dan subduksi menunjukkan angka dengan kisaran yang hampir mirip yaitu 0,012 hingga 672,322 kilometer pada variabel sesar dan 0,014 hingga 633,152 kilometer pada variabel subduksi, sedangkan jarak terdekat gempabumi ke gunung api memiliki *range* yang lebih jauh dibandingkan sesar dan subduksi yaitu 2,721 hingga 1.004,501 kilometer. Jarak terdekat gempabumi ke sesar memiliki nilai *Mean* atau rata-rata terkecil sebesar 161,693 kilometer. *Mean* terbesar yaitu variabel gunung api dengan nilai 2-3 kali lipat dari jarak terdekat gempabumi ke sesar sebesar 337,937 kilometer.

4.2 Pemodelan Gempabumi di Sulawesi-Maluku Menggunakan *Inhomogeneous Neyman-Scott Cox Processes*

Pemodelan gempabumi menggunakan *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Processes* terdiri dari 3 tahapan. Pertama, eksplorasi data dengan melakukan pengujian asumsi homogenitas dengan uji *chi-squared* dan analisis korelasi spasial dengan grafik *inhomogeneous K-function.* Kedua, estimasi parameter untuk mendapatkan model. Ketiga, validasi model dengan menggunakan *envelope K-function.*

4.2.1 Uji *Chi-squared*

Uji *chi-squared* dalam penelitian ini akan digunakan untuk menguji homogenitas dari data. Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut.

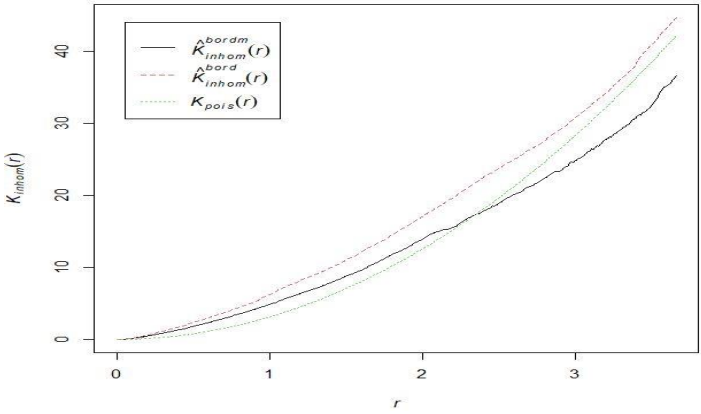
H_0 : Data mengikuti pola yang stasioner

H_1 : Data mengikuti pola yang tidak stasioner

Taraf signifikansi yang digunakan dalam pengujian ini sebesar $\alpha = 0,05$ dengan nilai $\chi^2 = 2856,9$ yang didapatkan berdasarkan persamaan 2.9 dengan nilai $n = 1081$ dan *quadrat count* atau nilai $m = 10 \times 10$. Hasil *P-value* sebesar $2,2 \times 10^{-16}$ sehingga nilai *P-value* yang didapatkan lebih kecil dari taraf signifikansi, maka keputusan yang diambil adalah tolak hipotesis nol. Kesimpulan yang didapatkan adalah data *spatial point pattern* yang digunakan mengikuti pola yang tidak stasioner.

4.2.2 Pengujian Korelasi Spasial dengan Grafik *Inhomogeneous K-function*

Pengujian korelasi spasial diperlukan untuk mengetahui korelasi spasial dari data apakah termasuk reguler, independen atau membentuk klaster. Pada uji *Chi-squared* diperoleh kesimpulan bahwa data mengikuti pola yang tidak stasioner sehingga pada pengujian korelasi spasial digunakan grafik *inhomogeneous K-function* yang dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3. Pengujian Korelasi Spasial Data *Spatial Point Pattern* dengan Grafik *Inhomogeneous K-function.*

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa dari pengujian secara visual yang dilakukan dengan menggunakan grafik *K-function*, sebaran data yang digunakan dalam penelitian ini cenderung membentuk kelompok atau mengklaster. Hal ini ditunjukkan dengan garis merah putus-putus yang merupakan *K-function* dengan *edge correction* berada di atas garis hijau putus-putus yang merupakan *K-function* untuk *Poisson process*.

4.2.3 Estimasi Parameter

Setelah melakukan eksplorasi data dengan uji *Chi-squared* dan grafik *K-function*, langkah selanjutnya adalah melakukan estimasi parameter. Pemilihan model terbaik dilakukan dengan cara menghilangkan variabel yang tidak memiliki pengaruh signifikan. Hasil estimasi parameter dengan menggunakan 3 variabel prediktor menunjukkan bahwa terdapat 2 variabel prediktor yang memiliki pengaruh signifikan terhadap gempabumi di Sulawesi-Maluku yaitu jarak terdekat gempabumi ke subduksi dan gunung api sedangkan jarak terdekat gempabumi ke sesar tidak memiliki pengaruh yang signifikan. Pada estimasi parameter selanjutnya, variabel jarak terdekat gempabumi ke sesar tidak dimasukkan dan diperoleh hasil pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3. Estimasi Parameter dengan Menghilangkan Variabel yang Tidak Memiliki Pengaruh Signifikan

Parameter	Estimasi	Exp(Beta)	*Z-value*	*Z-test*
$\hat{\beta}_0$	2,534	12,604	12,684	***
$\hat{\beta}_2$	-0,363	0,696	-3,624	***
$\hat{\beta}_3$	-0,275	0,760	-4,698	***
$\hat{\kappa}$	0,531	-	-	-
$\hat{\omega}$	0,236	-	-	-

*** Signifikan pada taraf signifikansi $\alpha = 0.001$

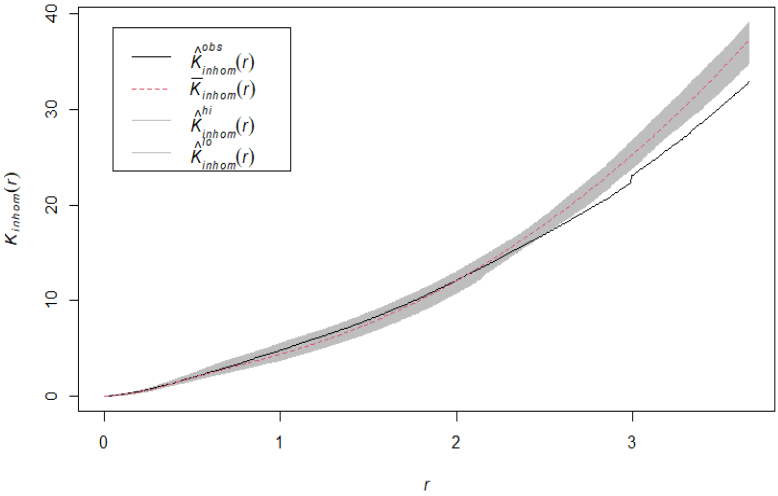
Berdasarkan hasil estimasi parameter pada Tabel 4.3, maka diperoleh model sebagai berikut.

$$\hat{p}(u) = 0,531 \times \exp\left(2,534 - 0,363Z_2(u) - 0,275Z_3(u)\right) \quad (1)$$

Terdapat beberapa informasi yang diperoleh berdasarkan model yang terbentuk. Pertama, nilai $\hat{\kappa}$ sebesar 0,531 dengan luas area penelitian sebesar 292,747 km^2 dan $\hat{\omega}$ 0,236 yang berarti estimasi jumlah gempabumi utama sebanyak 156 dengan standar deviasi gempa susulan disekitar gempa utama sebesar 23,6 km. Kedua, variabel jarak terdekat ke gunung api memberikan pengaruh paling besar terhadap risiko gempabumi. Ketiga, hasil estimasi parameter variabel jarak terdekat gempabumi ke subduksi maupun gunung api bernilai negatif yang berarti jarak terdekat ke subduksi maupun gunung api berbanding terbalik dengan risiko terjadinya gempabumi. Setiap penambahan 100 KM jarak suatu lokasi ke zona subduksi terdekat, peluang terjadinya gempabumi di lokasi tersebut akan berkurang 0,696 kali dan akan berkurang 0,76 kali setiap penambahan 100 KM jarak suatu lokasi ke gunung api terdekat sehingga dapat disimpulkan bahwa di wilayah Sulawesi-Maluku, semakin dekat suatu lokasi ke zona subduksi atau gunung api, maka akan meningkatkan risiko terjadinya gempabumi di lokasi tersebut.

4.2.4 Cek Kebaikan Model Menggunakan *Envelope K-function*

Pada sub bab sebelumnya, telah didapatkan model intensitas gempabumi di Sulawesi-Maluku. Tahap selanjutnya adalah validasi model untuk mengetahui seberapa baik model dalam menggambarkan intensitas gempabumi di Sulawesi-Maluku. Validasi model pada penelitian ini menggunakan *envelope K-function.* Hasil dari model *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Processes* akan dibandingkan dengan plot *K-function* data poin. Plot *envelope K-function* dapat dilihat pada Gambar 4.4.

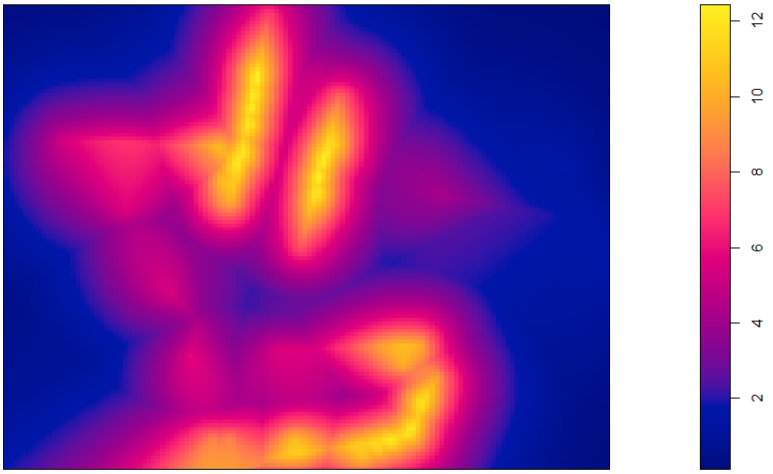


Gambar 4. 4. Cek Kebaikan Model dengan Menggunakan *Envelope K-function*

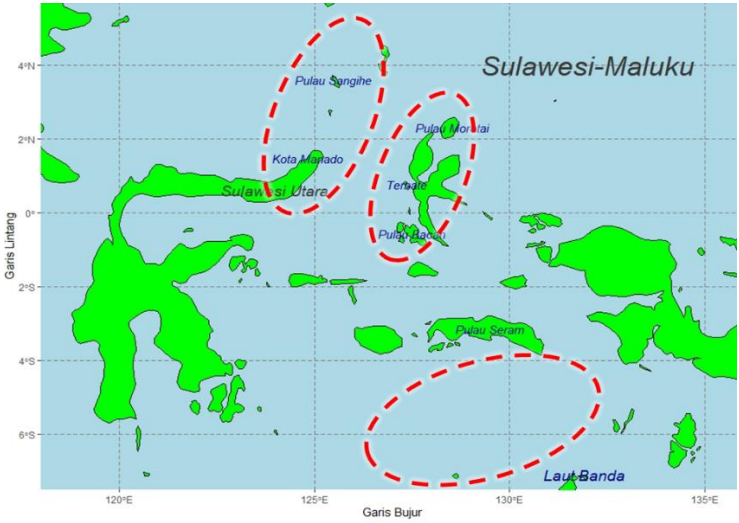
Model dapat dikatakan baik apabila plot *K-function* dari data poin berada pada interval *envelope K-function.* Pada Gambar 4, interval *envelope K-function* diwakili oleh batas atas dan batas bawah dari area yang berwarna abu-abu. Diketahui bahwa garis berwarna hitam yang merupakan *K-function* dari data yang diobservasi keluar dari *envelope K-function.* Garis hitam keluar dari *envelope* disekitar nilai $r > 260$ KM. Dapat disimpulkan bahwa *Thomas Process* baik dalam memodelkan gempabumi di Sulawesi-Maluku pada nilai radius tidak lebih dari 260 KM.

4.3 Prediksi Risiko Gempabumi di Sulawesi-Maluku

Risiko terjadinya gempabumi di Sulawesi-Maluku dapat diprediksi dalam bentuk plot intensitas gempabumi yang dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5. Plot Prediksi Intensitas Gempabumi di Sulawesi-Maluku



Gambar 4. 6. Pemetaan Wilayah dengan Risiko Gempabumi tinggi di Sulawesi-Maluku

Prediksi risiko gempabumi dijabarkan pada Gambar 4.5 merupakan prediksi dalam bentuk intensitas gempabumi di Sulawesi Maluku berdasarkan variabel prediktor jarak suatu lokasi ke subduksi dan gunung api terdekat. Terlihat bahwa intensitas gempabumi cenderung tinggi di bagian utara dan selatan wilayah Sulawesi-Maluku. Pemetaan wilayah dengan risiko gempabumi tinggi di Sulawesi-Maluku terdapat pada Gambar 4.6. Pada bagian utara, terbagi menjadi 2 klaster wilayah yang memiliki risiko gempabumi yang tinggi. Klaster pertama yaitu di sekitar Kota Manado ke arah utara hingga sekitar Pulau Sangihe. Klaster kedua berada di sekitar Maluku Utara, dekat dengan Pulau Bacan, Ternate hingga Pulau Morotai. Pada bagian selatan, di sekitar laut Banda di sebelah selatan Pulau Seram juga memiliki risiko gempabumi yang tinggi.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis pada data gempabumi di Sulawesi-Maluku pada tahun 2009-2018 didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Terdapat 3 karakteristik persebaran gempabumi di Sulawesi-Maluku. Pertama, setengah dari kejadian gempabumi di Indonesia terjadi di Sulawesi-Maluku. Kedua, secara visual pola kejadian gempabumi cenderung membentuk kelompok atau klaster dan cenderung mengelompok di wilayah utara dan selatan wilayah Sulawesi-Maluku. Ketiga, Jarak terdekat gempabumi di Sulawesi-Maluku terhadap gunung api relatif lebih jauh 2-3 kali lipat dibandingkan jarak terdekat terhadap sesar aktif dan subduksi. Persebaran gempabumi di Sulawesi-Maluku cenderung membentuk klaster dan tidak homogen.
2. Pemodelan dengan menggunakan *inhomogeneous Neyman-Scott Cox Processes* menunjukkan bahwa jarak terdekat gempabumi ke subduksi dan gunung api memiliki pengaruh yang signifikan terhadap risiko gempabumi di wilayah Sulawesi-Maluku dimana jarak terdekat gempabumi ke gunung api memiliki pengaruh yang paling besar, sedangkan variabel jarak terdekat gempabumi ke sesar tidak berpengaruh signifikan. Hasil estimasi parameter memberi informasi bahwa di wilayah Sulawesi-Maluku, semakin dekat suatu lokasi ke zona subduksi ataupun gunung api maka akan meningkatkan intensitas terjadinya gempabumi di wilayah tersebut. Validasi model *inhomogeneous* NSCP baik dalam memodelkan gempabumi di Sulawesi-Maluku pada klaster dengan radius tidak lebih dari 260 KM.
3. Wilayah dengan risiko gempabumi tinggi cenderung berada di bagian utara dan selatan wilayah Sulawesi-Maluku. Pada

bagian utara, wilayah disekitar Kota Manado, Pulau Sangihe dan Maluku Utara khususnya disekitar Pulau Bacan, Ternate dan Morotai memiliki risiko gempabumi yang tinggi sedangkan dibagian selatan, wilayah disekitar laut Banda disebelah selatan Pulau Seram juga memiliki risiko gempabumi yang tinggi.

5.2 Saran dan Rekomendasi

Berdasarkan hasil analisis serta kesimpulan yang diperoleh, Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah dapat menggunakan metode lain seperti *inhomogeneous Log-Gaussian Cox Processes* (LGCP), *Cauchy* atau *Variance Gamma* karena validasi model yang dihasilkan dengan menggunakan *Thomas* kurang baik untuk nilai r yang lebih dari 260 KM. Pemodelan juga dapat mempertimbangkan dampak faktor geologis yaitu sesar, subduksi dan gunung api terhadap kedalaman gempabumi. Rekomendasi yang dapat diajukan sebagai bahan pertimbangan kepada Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) daerah Sulawesi Maluku yaitu adanya pengawasan terhadap aktivitas subduksi dan gunung api di wilayah Sulawesi-Maluku dan meningkatkan upaya mengurangi kerugian yang dapat ditimbulkan oleh gempabumi dengan cara melakukan penguatan bangunan, penambahan alat deteksi gempabumi serta senantiasa melakukan penyuluhan dan sosialisasi mengenai aktivitas tektonik di wilayah Sulawesi-Maluku khususnya di daerah-daerah yang memiliki risiko gempabumi yang tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

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. In *Spatial Point Patterns Methodology and Applications with R*. https://doi.org/10.1201/b19708

BNPB. (2018). *Badan Nasional Penanggulangan Bencana*. 2018. https://www.bnpb.go.id

Bock, Y., Prawirodirdjo, L., Genrich, J. F., Stevens, C. W., McCaffrey, R., Subarya, C., Puntodewo, S. S. O., & Calais, E. (2003). Crustal motion in Indonesia from Global Positioning System measurements. *Journal of Geophysical Research*, *108*(B8). https://doi.org/10.1029/2001jb000324

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. 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

LIPI. (2018). *Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia*. 2018. http://lipi.go.id

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

Ministry of energy and mineral resources. (2012). *Pengenalan Gunungapi*. 12.

Peter, & W, M. (1965). Statistical Analysis of Earthquake Occurrence in Japan. *BIISEE*, *2*, 1–27.

Pusat Penelitian dan Pengembangan PUPR. (2017). *Buku Peta Gempa 2017*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Pemukiman Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan rakyat.

Retnowati, D. A., Meilano, I., Riqqi, A., & Hanifa, N. R. (2017). Spatial modeling for estimation of earthquakes economic loss in West Java. *AIP Conference Proceedings*, *1857*. https://doi.org/10.1063/1.4987117

Sakdiyah, K., & Choiruddin, A. 2020. *Model Inhomogeneous Log-Gaussian Cox Process (LGCP) Untuk Pemetaan Risiko Gempabumi Di Sumatra*, Submitted

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, M. T., & Pribadi, S. (2012). *Gempabumi Edisi Populer*.

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. (1970). 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

Waagepetersen, R. P. (2006). *Modern Statistics for Spatial Point Processes.: EBSCOhost*. *2003*.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Gempabumi magnitudo lebih dari sama dengan 5 tahun 2009-2018 di Sulawesi-Maluku

Tanggal..GMT	Latitude	Longitude	Kedalaman	Magnitudo
01/01/2009 03:45	-6.89	130.2309	98.5	5.13
01/01/2009 10:35	1.42	121.9938	10	5.04
02/01/2009 07:54	0.42	119.8955	10	5.34
02/01/2009 10:54	-6.37	128.3613	10	5.15
03/01/2009 19:43	-0.54	132.8925	16.6	7.92
03/01/2009 19:53	-0.77	132.0397	10	6.92
03/01/2009 20:04	-0.37	133.6429	10	6.51
03/01/2009 20:07	-0.25	133.7693	177.6	6.13
03/01/2009 20:26	1.63	134.3988	10	5.94
01/01/2009 03:45	-6.89	130.2309	98.5	5.13
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
04/12/2018 06:53	2.47	126.8733	61.1	5.56
05/12/2018 08:13	4.26	126.3065	55.1	5.34
11/12/2018 11:23	-0.17	124.5081	62	5.07
14/12/2018 19:27	-0.07	122.9988	151.5	5.19
17/12/2018 18:48	-3.38	129.3266	10	5.07
20/12/2018 19:26	1.92	127.2796	118.3	5.48
25/12/2018 07:18	1.24	126.4671	49.7	5.27
28/12/2018 03:03	-1.49	134.1008	51.9	5.83
30/12/2018 18:34	1.71	126.3956	53.8	5.1
31/12/2018 23:09	3.08	126.5733	10	5.06

Lampiran 2. *Syntax* R Input Data

```
################///////////////Install Packages\\\\\\\\\\\\\\\\################

library(maptools)
library(sp)
library(spatstat)
library(dplyr)
library(rgdal)
library(raster)
library("ggplot2")
library("sf")
library("rnaturalearth")
library("rnaturalearthdata")
library("ggrepel")

################///////////////Input Data\\\\\\\\\\\\\\\\####################

DataM5<-read.csv("D:/GEMPABUMI/M5.csv",header=T,sep=";") #Input data
gempabumi di Sulawesi-Maluku
dataM5_<-distinct(DataM5,latitude,longitude,.keep_all=TRUE) #Deteksi titik
gempa yang sama
X1<-read.csv("D:/GEMPABUMI/sesarSM.csv",header=T,sep=";") #Input data
Sesar di Sulawesi-Maluku
X2<-read.csv("D:/GEMPABUMI/SubduksiSM.csv",header=T,sep=";") #Input
data Subduksi di Sulawesi-Maluku
gunungapi<-read.csv("D:/GEMPABUMI/Gunung.csv",header=T,sep=";")
#Input  data gunung api di Indonesia

###Memotong Data Gunung Api di Sulawesi Maluku###

LU<-with(gunungapi,which(Latitude>5.7,arr.ind=TRUE))
gunungLU<-gunungapi[-LU,]
LS<-with(gunungLU,which(Latitude<(-7.5),arr.ind=TRUE))
gunungLS<-gunungLU[-LS,]
BB<-with(gunungLS,which(Longitude<118,arr.ind=TRUE))
gunungBB<-gunungLS[-BB,]
BT<-with(gunungBB,which(Longitude>136,arr.ind=TRUE))
X3<-gunungBB #Input data gunung api di Sulawesi-Maluku
```

Lampiran 3. *Syntax* R Karakteristik Data

```
########//////////Planar Point Pattern Gempabumi (Derajat)\\\\\\\\\\#########

long<-dataM5_$longitude
lat<-dataM5_$latitude
gempaSM<-ppp(long,lat,window = windowgempaSM) #point pattern gempa
sulawesi#
gempaSM

###############///////PSP dan PPP Variabel Prediktor
(Derajat)\\\\\\\#############

###Sesar Aktif Sulawesi Maluku###

x0s<-X1$x0
y0s<-X1$y0
x1s<-X1$x1
y1s<-X1$y1
faultSM<-psp(y0s,x0s,y1s,x1s,window = windowgempaSM)

###Subduksi Sulawesi Maluku###

x0sub<-X2$x0
y0sub<-X2$y0
x1sub<-X2$x1
y1sub<-X2$y1
subductionSM<-psp(y0sub,x0sub,y1sub,x1sub,window = windowgempaSM)

###Gunung Api Aktif Sulawesi Maluku###

latgSM<-X3$Latitude
longgSM<-X3$Longitude
vulcanoSM<-ppp(longgSM,latgSM,window = windowgempaSM)
```

Lampiran 3. *Syntax* R Karakteristik Data (Lanjutan)

```
########/////Mapping Gempabumi Sulawesi-Maluku Tahun 2009-
2018\\\\\##########

###Mengubah PSP dan PPP menjadi data frame###

gempasmnew<-as.data.frame(gempaSM)
volcanosmnew<-as.data.frame(vulcanoSM)
faultsmnew<-as.data.frame(faultSM)
subductionsmnew<-as.data.frame(subductionSM)

###Membuat Map Distribusi Gempabumi, Sesar, Subduksi dan Gunung
Api###

world<- ne_countries(scale = "medium", returnclass = "sf")
class(world)

ggplot(data = world) +
  geom_sf(color = "black", fill = "green") +
  annotate(geom = "text", x = 132, y = 4, label = "Sulawesi-Maluku",
           fontface = "italic", color = "grey22", size = 9) +
  coord_sf(xlim = c(118, 136), ylim = c(-7.5, 5.7), expand = FALSE) +
  xlab("Garis Bujur") +ylab("Garis Lintang") +
  theme(panel.grid.major=element_line(color=gray(.5),linetype =
"dashed",size = 0.5),
        panel.background = element_rect(fill="lightblue"))+
  geom_point(data = gempasmnew, aes(x = x, y = y), shape=21, size =
2,fill="red")+
  geom_point(data=volcanosmnew, aes(x=x,y=y),shape=24,size= 4,
fill="black") +

geom_segment(data=faultsmnew,aes(x=x0,y=y0,xend=x1,yend=y1),colour=
"magenta",size=1)+

geom_segment(data=subductionsmnew,aes(x=x0,y=y0,xend=x1,yend=y1),c
olour="darkblue",size=1.5)
```

Lampiran 4. *Syntax* R Mengubah Satuan Derajat Menjadi 100 KM

```
###########///////Menentukan Window Sulawesi-Maluku (100Km)\\\\\\\###########

windowgempaSM<-owin(xrange=c(118*1.11,136*1.11),yrange=c(-
7.5*1.11,5.7*1.11))
area.window<-area.owin(windowgempaSM)

##########//////////Planar Point Pattern Gempabumi (100km)\\\\\\\\\\##########

long<-(dataM5_$longitude*1.11)
lat<-(dataM5_$latitude*1.11)
gempaSM<-ppp(long,lat,window = windowgempaSM) #point pattern gempa
sulawesi#
plot(density(gempaSM))

##########//////////Planar Point Pattern Gempabumi (100Km)\\\\\\\\\\##########

###Sesar Aktif Sulawesi Maluku###
x0s<-(X1$x0*1.11)
y0s<-(X1$y0*1.11)
x1s<-(X1$x1*1.11)
y1s<-(X1$y1*1.11)
faultSM<-psp(y0s,x0s,y1s,x1s,window = windowgempaSM)

###Subduksi Sulawesi Maluku###
x0sub<-(X2$x0*1.11)
y0sub<-(X2$y0*1.11)
x1sub<-(X2$x1*1.11)
y1sub<-(X2$y1*1.11)
subductionSM<-psp(y0sub,x0sub,y1sub,x1sub,window = windowgempaSM)

###Gunung Api Aktif Sulawesi Maluku###

latgSM<-(X3$Latitude*1.11)
longgSM<-(X3$Longitude*1.11)
vulcanoSM<-ppp(longgSM,latgSM,window = windowgempaSM)
```

Lampiran 5. *Syntax* R Uji Homogenitas dengan *Chi-Squared*

```
###Uji Homogenitas dengan Chi-Squared###

gridgempaSM<-quadratcount(gempaSM,10,10)
ujihomogenitas<-quadrat.test(gridgempaSM)
ujihomogenitas
```

Lampiran 6. *Syntax* R Cek Korelasi Spasial dengan Plot *K-Function*

```
###Cek Korelasi spasial dengan K-function###

ind.test<-Kinhom(gempaSM,nlarge = 2000, correction = c("border", "bord.modif"))
windows()
plot(ind.test)
dev.off()
```

Lampiran 7. *Syntax* R Fungsi Jarak Variabel Prediktor ke Gempabumi Terdekat

```
###Fungsi jarak Sesar###

dX1<-with(gempaSM,distfun(faultSM))
plot(dX1)
summary(dX1)

###Fungsi Jarak Subduksi###

dX2<-with(gempaSM,distfun(subductionSM))
plot(dX2)
summary(dX2)

###Fungsi Jarak Gunung Api###

dX3<-with(gempaSM,distfun(vulcanoSM))
plot(dX3)
summary(dX3)
```

Lampiran 8. *Syntax* R Estimasi Parameter dengan *Thomas Process* dan *Second Order Composite Likelihood*

```
##########/////////Estimasi Parameter dengan 3 variabel Prediktor\\\\\\\#######

fit1<-kppm(gempaSM ~ dX1+dX2+dX3,"Thomas",method="clik2")
fit1
summary(fit1)

##########/////////Estimasi Parameter tanpa variabel sesar\\\\\\\\\\###########

fit2<-kppm(gempaSM ~ dX2+dX3,"Thomas", method="clik2")
fit2
summary(fit2)
area.owin(windowgempaSM)
```

Lampiran 9. *Syntax* R Validasi Model dengan *Envelope K-Function*

```
###############/////////////Validasi Model\\\\\\\\\\\\\\\\#################

b<-envelope(fit2,Kinhom)
plot(b, main=NULL,legendargs=list(cex=0.75, xpd=TRUE ))
summary(b)
```

Lampiran 10. *Syntax* R Prediksi Risiko Gempabumi Sulawesi-Maluku

```
##########/////////Prediksi Risiko Gempabumi Sul-
Mal\\\\\\\\\\###########

a<-predict.kppm(fit2)
plot(a)

####################/////////////////END\\\\\\\\\\\\\\\\\\\#################
```

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

```
> summary(dX1)
Distance function for line segment pattern
defined in the rectangle [130.98, 150.96] x [-8.325, 6.327] units

Distance function values:
        range = [0.0001236946, 6.723224]
        mean = 1.616935
> summary(dX2)
Distance function for line segment
pattern
defined in the rectangle [130.98, 150.96]
x [-8.325, 6.327] units

Distance function values:
        range = [0.0001354614, 6.331516]
        mean = 1.758594
> summary(dX3)
Distance function for point pattern
defined in the rectangle [130.98, 150.96] x [-8.325,
6.327] units

Distance function values:
        range = [0.0272063, 10.045]
        mean = 3.379368
```

Lampiran 12. *Output* Uji *Chi-Squared*

```
> ujihomogenitas

        Chi-squared test of CSR using quadrat counts

data:
X2 = 2856.9, df = 99, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: two.sided

Quadrats: 10 by 10 grid of tiles
```

Lampiran 13. *Output* Model dengan 3 Variabel Prediktor

```
> summary(Model1)
Inhomogeneous cluster point process model
Fitted to point pattern dataset 'gempaSM'
Fitted by maximum second order composite likelihood
          rmax = 3.663
          weight function: Indicator(distance <= 1.8315)
Converged successfully after 75 function evaluations

---------- TREND MODEL -----
Point process model
Fitting method: maximum likelihood (Berman-Turner
approximation)
Model was fitted using glm()
Algorithm converged
Call:
ppm.ppp(Q = X, trend = trend, rename.intercept = FALSE, covariates =
covariates,
   covfunargs = covfunargs, use.gam = use.gam, forcefit = TRUE,
   nd = nd, eps = eps)
Edge correction: "border"
          [border correction distance r = 0 ]
------------------------------------------------------------
Quadrature scheme (Berman-Turner) = data + dummy +
weights

Data pattern:
Planar point pattern:  1081 points
Average intensity 3.69 points per square unit
Window: rectangle = [130.98, 150.96] x [-8.325, 6.327]
units
          (19.98 x 14.65 units)
Window area = 292.747 square units
```

Lampiran 13. *Output* Model dengan 3 Variabel Prediktor (Lanjutan)

```
Original dummy parameters: =
Planar point pattern:  4904 points
Average intensity 16.8 points per square unit
Window: rectangle = [130.98, 150.96] x [-8.325, 6.327]
units
                (19.98 x 14.65 units)
Window area = 292.747 square units
Quadrature weights:
    (counting weights based on 70 x 70 array of
    rectangular tiles)
All weights:
            range: [0.00221, 0.0597]        total: 293
Weights on data points:
            range: [0.00221, 0.0299]        total: 21.4
Weights on dummy points:
            range: [0.00221, 0.0597]        total: 271
------------------------------------------------------------
FITTED MODEL:

Nonstationary Poisson process

---- Intensity: ----

Log intensity: ~dX1 + dX2 + dX3
Model depends on external covariates ‘dX1’, ‘dX2’ and
‘dX3’
Covariates provided:
            dX1: distfun
            dX2: distfun
            dX3: distfun
```

Lampiran 13. *Output* Estimasi Parameter dengan 3 Variabel Prediktor (Lanjutan)

```
             Estimate       S.E.    CI95.lo    CI95.hi
(Intercept)  2.3589727 0.06075676  2.2398916  2.4780537
dX1          0.1444949 0.02345086  0.0985321  0.1904578
dX2         -0.3851834 0.04021408 -0.4640016 -0.3063653
dX3         -0.2805152 0.02228017 -0.3241836 -0.2368469
            Ztest       Zval
(Intercept)   ***  38.826506
dX1           ***   6.161606
dX2           ***  -9.578323
dX3           *** -12.590354

---------- gory details -----

Fitted regular parameters (theta):
(Intercept)        dX1        dX2        dX3
  2.3589727   0.1444949  -0.3851834  -0.2805152

Fitted exp(theta):
(Intercept)        dX1        dX2        dX3
 10.5800767   1.1554558   0.6803258   0.7553944

---------- CLUSTER MODEL ----------
Model: Thomas process

Fitted cluster parameters:
    kappa     scale
0.5541704 0.2315804
Mean cluster size:  [pixel image]

Final standard error and CI
(allowing for correlation of cluster process):
             Estimate       S.E.       CI95.lo
(Intercept)  2.3589727 0.20075413  1.9655018050
dX1          0.1444949 0.07396792 -0.0004795331
dX2         -0.3851834 0.10093187 -0.5830062613
dX3         -0.2805152 0.05764168 -0.3934908442
              CI95.hi Ztest      Zval
(Intercept)  2.7524435   *** 11.750556
dX1          0.2894694        1.953481
dX2         -0.1873606   *** -3.816272
dX3         -0.1675396   *** -4.866535
```

Lampiran 14. *Output* Estimasi Parameter dengan 2 Variabel Prediktor

```
> summary(Model2)
Inhomogeneous cluster point process model
Fitted to point pattern dataset 'gempaSM'
Fitted by maximum second order composite likelihood
          rmax = 3.663
          weight function: Indicator(distance <= 1.8315)
Converged successfully after 77 function evaluations

---------- TREND MODEL -----
Point process model
Fitting method: maximum likelihood (Berman-Turner
approximation)
Model was fitted using glm()
Algorithm converged
Call:
ppm.ppp(Q = X, trend = trend, rename.intercept = FALSE, covariates =
covariates,
   covfunargs = covfunargs, use.gam = use.gam, forcefit = TRUE,
   nd = nd, eps = eps)
Edge correction: "border"
          [border correction distance r = 0 ]
------------------------------------------------------------
Quadrature scheme (Berman-Turner) = data + dummy +
weights

Data pattern:
Planar point pattern:  1081 points
Average intensity 3.69 points per square unit
Window: rectangle = [130.98, 150.96] x [-8.325, 6.327]
units
              (19.98 x 14.65 units)
Window area = 292.747 square units

Dummy quadrature points:
    70 x 70 grid of dummy points, plus 4 corner points
    dummy spacing: 0.2854286 x 0.2093143 units
```

Lampiran 14. *Output* Estimasi Parameter dengan 2 Variabel Prediktor (Lanjutan)

```
Original dummy parameters: =
Planar point pattern:  4904 points
Average intensity 16.8 points per square unit
Window: rectangle = [130.98, 150.96] x [-8.325, 6.327]
units
                (19.98 x 14.65 units)
Window area = 292.747 square units
Quadrature weights:
    (counting weights based on 70 x 70 array of
    rectangular tiles)
All weights:
            range: [0.00221, 0.0597]       total: 293
Weights on data points:
            range: [0.00221, 0.0299]       total: 21.4
Weights on dummy points:
            range: [0.00221, 0.0597]       total: 271
------------------------------------------------------------
FITTED MODEL:

Nonstationary Poisson process

---- Intensity: ----

Log intensity: ~dX2 + dX3
Model depends on external covariates ‘dX2’ and ‘dX3’
Covariates provided:
            dX2: distfun
            dX3: distfun
```

Lampiran 14. *Output* Estimasi Parameter dengan 2 Variabel Prediktor (Lanjutan)

```
Fitted trend coefficients:
(Intercept)        dX2        dX3
  2.5333928  -0.3631826  -0.2749687

             Estimate       S.E.    CI95.lo    CI95.hi
(Intercept)  2.5333928 0.05464101  2.4262984  2.6404872
dX2         -0.3631826 0.03959150 -0.4407805 -0.2855847
dX3         -0.2749687 0.02192652 -0.3179438 -0.2319935
            Ztest       Zval
(Intercept)   ***  46.364310
dX2           ***  -9.173247
dX3           *** -12.540460

----------- gory details -----

Fitted regular parameters (theta):
(Intercept)        dX2        dX3
  2.5333928  -0.3631826  -0.2749687

Fitted exp(theta):
(Intercept)        dX2        dX3
 12.5961702   0.6954594   0.7595959

----------- CLUSTER MODEL -----------
Model: Thomas process

Fitted cluster parameters:
    kappa     scale
0.5307625 0.2355149
Mean cluster size:  [pixel image]

Final standard error and CI
(allowing for correlation of cluster process):
             Estimate       S.E.    CI95.lo    CI95.hi
(Intercept)  2.5333928 0.19973238  2.1419245  2.9248611
dX2         -0.3631826 0.10022191 -0.5596139 -0.1667512
dX3         -0.2749687 0.05853034 -0.3896860 -0.1602513
            Ztest      Zval
(Intercept)   *** 12.683937
dX2           *** -3.623784
dX3           *** -4.697882
```

Lampiran 15. Surat Pernyataan Data Sekunder

SURAT PERNYATAAN

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

Nama : Finola Trisnisa

NRP : 06211640000020

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. 1991201911101

Surabaya, 12 Juni 2020

(Finola Trisnisa)
NRP.06211640000020

*(coret yang tidak perlu)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS

Penulis dengan nama lengkap Finola Trisnisa merupakan anak kedua dari pasangan Pinarto dan Eny Widayati. Penulis lahir di Banyuwangi pada tanggal 24 Januari 1998. Pendidikan formal penulis ditempuh di SDN I Sidorejo, SMPN 1 Purwoharjo, dan SMAN 1 Genteng. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan formal di Program Studi Sarjana Departemen Statistika ITS. Penulis diterima di ITS pada tahun 2016 melalui jalur SNMPTN. Selama perkuliahan, penulis aktif di berbagai kepanitiaan antara lain sebagai fasilitator kestari di GERIGI-ITS pada tahun 2017, Pekan Raya Statistika (PRS) 2018, Bursa Karir ITS 36-38 pada tahun 2018-2019. Selain itu, penulis juga aktif di Himpunan Mahasiswa Departemen Statistika ITS (HIMASTA-ITS) yaitu Tim Penelitian dan Pengembangan (LITBANG) sebagai Staff pada periode 2017-2018. Pengalaman kerja penulis diantaranya menjadi surveyor penduduk usia sekolah pendidikan dasar yang terindikasi tidak bersekolah di Kota Surabaya pada tahun 2018, petugas data *entry* kebutuhan dasar dipenuhi di Badan Perencanaan Pembangunan Kota Surabaya tahun 2018, asisten pembicara pelatihan peningkatan kapasitas SDM Aparatur Perencana dalam Pengelolaan Data Spasial yang diselenggarakan oleh BAPPELITBANGDA Kota Pasuruan, asisten pembicara pelatihan data statistik sektoral untuk perangkat daerah dari pemerintah Provinsi Jawa Timur dan melakukan kerja praktik di Dinas Komunikasi dan Informatika (DISKOMINFO) Provinsi Jawa Timur. Apabila pembaca ingin memberikan kritik dan saran serta diskusi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini, dapat menghubungi penulis melalui email trisnisafinola@gm-ail.com atau nomor telepon 082232812023.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)