

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan Penelitian

Penelitian Tugas Akhir ini dilaksanakan pada tanggal 1 Maret – 30 Juni 2017 di Perpustakaan Pusat Universitas Brawijaya. Penelitian tersebut terbagi ke dalam beberapa tahap. Tahap studi literatur dilaksanakan pada tanggal 1 Maret – 31 Maret 2017. Tahap pengambilan data katalog gempa sebagai data sekunder dilaksanakan pada tanggal 13 Maret 2017 dan 27 April 2017. Tahap pengolahan data dilaksanakan pada tanggal 25 April – 28 Mei 2017. Sementara itu, penulisan laporan Tugas Akhir dilaksanakan pada tanggal 1 April – 30 Juni 2017. Secara umum, pelaksanaan Tugas Akhir ini ditampilkan dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Alokasi waktu pelaksanaan penelitian Tugas Akhir

Kegiatan	Waktu Pengerjaan (Minggu ke-)															
	Maret				April				Mei				Juni			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur																
Pengambilan Data																
Pengolahan Data																
Interpretasi Data																
Penulisan Laporan																

### 3.2 Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan model rantai Markov untuk menganalisis kejadian gempa bumi di Jawa Timur secara spasial, magnitudo, maupun temporal. Kejadian gempa dipisahkan antara gempa yang berasosiasi dengan sesar darat berkedalaman dangkal (selanjutnya disebut sebagai gempa sesar darat) dengan gempa yang berasosiasi dengan aktivitas subduksi (selanjutnya disebut sebagai gempa subduksi). Sebelum dianalisis, data gempa perlu didekluster

untuk memperoleh data gempa utama. Dalam melakukan analisis gempa secara spasial, wilayah penelitian dibagi ke dalam 9 region. Matriks probabilitas transisi satu langkah kejadian gempa dibuat dengan masing-masing region sebagai keadaan. Setelah diperoleh matriks probabilitas transisi, dibuat diagram transisi untuk mengetahui transisi kejadian gempa dominan di wilayah penelitian. Untuk mengetahui adanya keterkaitan antarkejadian gempa di wilayah penelitian secara spasial, dilakukan uji hipotesis dengan Chi Kuadrat. Analisis rantai Markov secara spasial ini dilakukan untuk magnitudo batas yang berbeda-beda. Sementara itu, untuk melakukan analisis secara magnitudo, magnitudo gempa dikategorikan ke dalam 3 keadaan, yaitu gempa kecil, gempa moderat, dan gempa besar. Selanjutnya, dalam upaya analisis bahaya kegempaan di wilayah penelitian dilakukan analisis rantai Markov secara temporal. Setiap region ditentukan keadaannya, yaitu aktif (1) dan inaktif (0), di setiap interval waktu yang ditentukan (1 tahun). Penentuan keadaan ini berdasarkan kejadian gempa bermagnitudo moderat dengan kedalaman dangkal di masing-masing region. Dari matriks probabilitas transisi periode aktif maupun inaktif diperoleh durasi rata-rata periode aktif dan inaktif di masing-masing region.

### 3.3 Material Penelitian

Dalam pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini diperlukan sejumlah materi, yaitu terdiri dari alat dan bahan sebagai berikut:

1. *Laptop Acer Aspire 4652 32-bit Operating System* dengan kapasitas memori 2 GB sebagai perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini dan telah terpasang sejumlah perangkat lunak, di antaranya:
  - a) *Microsoft Excel 2007*, merupakan program pengolah angka yang digunakan dalam tahap pemilahan dan pengolahan awal data gempa. Selain itu juga digunakan dalam melakukan analisis rantai Markov (perhitungan matriks frekuensi dan probabilitas transisi) serta uji Chi Kuadrat.
  - b) *Notepad* yang digunakan untuk menyimpan data yang telah diolah *Microsoft Excel* dalam format “.dat”.
  - c) *Notepad++* yang digunakan untuk mengolah data dalam format “.dat”.

- d) *Matlab* versi 7.10.0.499 (R2010a) yang digunakan untuk menjalankan kode program *ZMAP* versi 6.
  - e) *ZMAP* versi 6, merupakan kumpulan kode program yang dikembangkan oleh Wyss dan Wiemer (2003) untuk melakukan tahap dekluster.
  - f) *Generic Mapping Tool* (GMT) merupakan kumpulan paket yang digunakan untuk membuat peta seismisitas wilayah penelitian.
2. Data sekunder berupa data kejadian gempa bumi yang diperoleh dari katalog gempa USGS mulai tanggal 1 Januari 1960 hingga 27 April 2017 dengan  $M \geq 3$  untuk gempa sesar darat dan  $M \geq 4$  untuk gempa subduksi. Data gempa mencakup kejadian gempa di wilayah penelitian dengan batas koordinat  $05^{\circ}29'24''$  LS –  $11^{\circ}54'07''$  LS dan  $111^{\circ}00'00''$  BT –  $114^{\circ}56'32''$  BT.

### 3.4 Langkah Penelitian

#### 3.4.1 Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari katalog gempa bumi USGS. Katalog ini merupakan gabungan dari data gempa yang dikeluarkan oleh *Global Centroid Moment Tensor* (GCMT), *Harvard University* (HRV), *National Earthquake Information Center USGS* (US), *Lembaga Meteorologi dan Geofisika, Jakarta, Indonesia* (DJA), *National Earthquake Information Center NEIC* (NC), dan *International Seismological Centre Global Earthquake Model* (ISCGEM). Data tersebut dapat diunduh melalui laman: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.

Dalam pengunduhan data gempa digunakan sejumlah kriteria. Kriteria tersebut meliputi rentang tanggal kejadian gempa, magnitudo minimum gempa, kedalaman minimum, dan batas koordinat. Data diperoleh dalam format *comma separated value* (CSV). Data tersebut memberikan informasi mengenai waktu kejadian gempa (*origin time*) dalam format YYYY-MM-DDTHH:MM:SS.SZ, lintang dan bujur (derajat desimal) sumber gempa, kedalaman (km) sumber gempa, letak geografis gempa (jarak dalam km dari sebuah kota kabupaten atau kecamatan terdekat), *root mean square* (*rms*), magnitudo dan tipenya, maupun tingkat eror

posisi horisontal, vertikal, dan magnitudo. Selanjutnya, data dalam format CSV dibuka melalui lembar kerja *Microsoft Excel 2007*. Informasi yang diperlukan dalam penelitian ini adalah waktu asal gempa, lintang, bujur, kedalaman sumber gempa, dan magnitudonya. Informasi mengenai eror horisontal dan kedalaman sumber gempa digunakan dalam tahap dekluster.

### 3.4.2 Dekluster Data

Data yang diperoleh dari pengunduhan sebelumnya masih mencakup semua data gempa bumi, yakni gempa utama dan gempa ikutan (gempa pendahuluan dan susulan). Dalam penelitian ini hanya digunakan data gempa utama. Oleh karena itu, gempa pendahuluan dan gempa susulan perlu dipisahkan dari data gempa utama melalui tahap dekluster. Tahap dekluster dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *ZMAP* versi 6 yang dioperasikan melalui *Matlab*. Dalam penelitian ini, metode yang digunakan untuk dekluster adalah metode *cluster* yang algoritmanya dikembangkan oleh Reasenberg (1985). Pemilihan metode dekluster dengan algoritma Reasenberg dikarenakan metode ini merupakan metode yang sering digunakan dalam tahap dekluster (Van Stiphout dkk., 2012). Selain mempertimbangkan kepraktisan penerapannya, penggunaan algoritma Reasenberg juga berdasarkan kenyataan pembentukan kluster gempa susulan di sekitar gempa utama.

Dalam tahap dekluster dengan algoritma Reasenberg diperlukan informasi awal sejumlah parameter, yaitu *taumin* yang merupakan waktu minimum untuk membentuk sebuah kluster jika gempa pertama tidak diklusterkan, *taumax* yang merupakan waktu maksimum untuk membentuk sebuah kluster,  $P_l$  merupakan tingkat keyakinan untuk mengamati adanya kejadian gempa selanjutnya dalam sekuen tersebut,  $xk$  merupakan faktor peningkatan magnitudo *cutoff* bawah dalam kluster (*xmeff*), *r*fact merupakan faktor dalam menentukan radius interaksi dari sebuah gempa susulan, *epicenter-error* yakni besar eror dalam penentuan lokasi horisontal, dan *depth-error* yakni besar eror dalam penentuan lokasi hiposenter. Informasi lebih lengkap mengenai parameter yang digunakan dalam tahap dekluster dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter yang digunakan dalam dekluster untuk kasus gempa sesar darat dan gempa subduksi

Parameter	Gempa Sesar Darat	Gempa Subduksi
<i>taumin</i> (hari)	1	1
<i>taumax</i> (hari)	790	970
$P_1$	0,95	0,95
$Xk$	0,5	0,5
<i>Xmeff</i>	4,3	4,8
<i>Rfact</i>	10	10
<i>epicenter-error</i> (km)	6	7
<i>depth-error</i> (km)	7	10

Dalam penelitian ini, *taumin* bernilai 1 hari sedangkan *taumax* bernilai 780 hari untuk kasus gempa sesar darat dan 970 hari untuk kasus gempa subduksi. Penentuan nilai *taumax* ini mengadopsi metode dekluster jendela waktu Gardner dan Knopoff (1974). Magnitudo terbesar yang terdapat dalam katalog gempa, yaitu  $M_w$  6,6 untuk gempa sesar darat dan  $M_w$  7,8 untuk gempa subduksi. Menurut algoritma Gardner dan Knopoff, kasus gempa  $M_w$  7,8 memiliki nilai jendela waktu sebesar 970 hari. Artinya, untuk gempa  $M_w$  7,8 diperlukan waktu hingga 970 hari untuk membentuk sebuah kluster di sekitar sumber gempa. Kluster ini terdiri dari kumpulan gempa susulan dan gempa utama. Tentunya sebagai gempa utama dalam kluster adalah gempa dengan magnitudo terbesar.

Nilai *xmeff* diperoleh dengan mengplot kejadian gempa pada grafik hubungan logaritma frekuensi kejadian dan magnitudo. Nilai *xmeff* merupakan magnitudo gempa yang sudah tidak lagi mengikuti kelinieran kurva pada grafik tersebut. Nilai *rfact* menggunakan nilai standar, yaitu 10. Nilai *epicenter-error* dan *depth-error* dalam penelitian ini menggunakan nilai eror rata-rata. Penentuan nilai eror ini sangat penting untuk kasus wilayah dengan jumlah data gempa yang relatif sedikit (Van Stiphout dkk., 2012). Selanjutnya, grafik frekuensi kumulatif kejadian gempa sebelum dan setelah didekluster dibandingkan untuk mengevaluasi tahap dekluster gempa yang telah dilakukan.

### **3.4.3 Pembuatan Peta Seismisitas**

Peta seismisitas memberikan informasi mengenai lokasi (lintang dan bujur) episenter, kedalaman sumber gempa, dan magnitudo gempa. Pemetaan dilakukan dengan perangkat lunak GMT. Data gempa utama yang diperoleh dari proses dekluster ditampilkan dalam peta dengan menggunakan simbol yang berbeda. Episenter gempa disimbolkan dengan lingkaran. Radius lingkaran mewakili magnitudonya. Semakin besar radius lingkaran, semakin besar magnitudo gempa tersebut. Warna lingkaran menunjukkan kedalaman dari episenter. Dalam pembuatan peta seismisitas ini terdapat tiga macam warna yang mewakili jenis gempa berdasarkan kedalaman, yakni gempa dangkal, gempa menengah, dan gempa dalam. Peta seismisitas ini dapat dijadikan sebagai pertimbangan dalam menentukan batas dari region-region di wilayah penelitian.

### **3.4.4 Penentuan Keadaan**

Tahap ini merupakan salah satu tahap penting dalam analisis rantai Markov. Dalam penelitian ini dilakukan analisis rantai Markov secara spasial (dari region ke region), magnitudo (dari magnitudo ke magnitudo), dan temporal (dari periode aktif ke periode inaktif atau sebaliknya) dengan keadaan yang digunakan bersifat diskrit.

Seperti yang telah diketahui bahwa terdapat dua macam gempa tektonik yang terjadi di wilayah Jawa Timur, yaitu gempa yang berkaitan dengan peristiwa subduksi di Samudera Hindia maupun gempa akibat sesar lokal di darat yang umumnya memiliki kedalaman relatif dangkal. Untuk menghindari adanya kerancuan dalam interpretasi hasil analisis, maka analisis rantai Markov secara spasial pada kasus gempa subduksi dan gempa sesar darat dibedakan. Hal ini disebabkan kedua gempa tersebut terjadi melalui mekanisme yang berbeda. Selain itu, frekuensi kejadian gempa subduksi di wilayah penelitian jauh lebih tinggi daripada gempa sesar darat. Apabila dua kejadian gempa tersebut tidak dibedakan, kejadian gempa subduksi akan lebih mendominasi daripada kejadian gempa sesar darat.

Gempa subduksi di wilayah penelitian adalah gempa yang terjadi di wilayah dengan batas koordinat  $111^{\circ}00'00''$  BT –  $114^{\circ}56'32''$  BT dan  $08^{\circ}25'52''$  LS –  $11^{\circ}54'07''$  LS serta gempa dengan kedalaman hiposenter  $> 70$  km di wilayah dengan batas

koordinat  $111^{\circ}00'00''$  BT –  $114^{\circ}56'32''$  BT dan  $05^{\circ}29'24''$  LS –  $08^{\circ}25'52''$  LS.

Untuk menganalisis kejadian gempa subduksi secara spasial, wilayah penelitian dibagi ke dalam sembilan region. Region-region tersebut diwakili dengan *grid-grid* yang tidak seragam ukurannya. Penentuan masing-masing *grid* wilayah berdasarkan kluster gempa yang diketahui dari peta seismisitas maupun pembagian kejadian gempa di zona subduksi Jawa menurut Kertapati (2006). Pembagian region ini juga mempertimbangkan hasil beberapa penelitian sebelumnya, yaitu Puspita (2015), Amalia (2016), dan Handayani (2010). Kesembilan region tersebut dibatasi oleh koordinat seperti yang diperlihatkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Batas koordinat masing-masing region di wilayah penelitian untuk kasus gempa subduksi

Region	Bujur	Lintang
A1	$111^{\circ}00'00'' - 112^{\circ}19'36''$	$-05^{\circ}29'24'' - -08^{\circ}25'52''$
A2	$112^{\circ}19'36'' - 113^{\circ}40'23''$	$-05^{\circ}29'24'' - -08^{\circ}25'52''$
A3	$113^{\circ}40'23'' - 114^{\circ}56'32''$	$-05^{\circ}29'24'' - -08^{\circ}25'52''$
B1	$111^{\circ}00'00'' - 112^{\circ}19'36''$	$-08^{\circ}25'52'' - -10^{\circ}03'31''$
B2	$112^{\circ}19'36'' - 113^{\circ}40'23''$	$-08^{\circ}25'52'' - -10^{\circ}03'31''$
B3	$113^{\circ}40'23'' - 114^{\circ}56'32''$	$-08^{\circ}25'52'' - -10^{\circ}03'31''$
C1	$111^{\circ}00'00'' - 112^{\circ}19'36''$	$-10^{\circ}03'31'' - -11^{\circ}54'07''$
C2	$112^{\circ}19'36'' - 113^{\circ}40'23''$	$-10^{\circ}03'31'' - -11^{\circ}54'07''$
C3	$113^{\circ}40'23'' - 114^{\circ}56'32''$	$-10^{\circ}03'31'' - -11^{\circ}54'07''$

Berdasarkan pembagian region ini, maka suatu kejadian gempa dapat diidentifikasi keadaan regionnya dengan meninjau koordinat episenter gempa tersebut. Sebagai contoh, gempa yang terjadi pada tanggal 28 September 1998 ( $M$  6,6) dengan koordinat episenternya  $112,413^{\circ}$  BT dan  $8,194^{\circ}$  LS serta kedalaman fokus 151,60 km. Berdasarkan informasi parameter gempa tersebut, gempa ini terjadi di region A2.

Sementara itu, gempa sesar darat adalah gempa yang terjadi di wilayah dengan batas koordinat  $111^{\circ}00'00''$  BT –  $114^{\circ}56'32''$  BT dan  $08^{\circ}25'52''$  LS –  $11^{\circ}54'07''$  LS (region dengan kode A pada kasus gempa subduksi) dan kedalaman fokus  $d < 70$  km. Penentuan kedalaman sesar darat ini sesuai dengan definisi gempa dangkal menurut Lay dan Wallace (1995) yang menyebutkan bahwa gempa

dangkal adalah gempa dengan kedalaman hiposenter kurang dari 70 km. Untuk menganalisis secara spasial kasus gempa sesar darat, wilayah penelitian dibagi ke dalam sembilan region. Pembagian tersebut mempertimbangkan fisiografi wilayah penelitian menurut Van Bemmelen (1949). Kesembilan region tersebut dibatasi oleh koordinat seperti yang ditampilkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Batas koordinat masing-masing region di wilayah penelitian untuk kasus gempa sesar darat

Region	Bujur	Lintang
<b>1a</b>	111°00'00" – 112°19'36"	-05°29'24" – -06°35'50"
<b>1b</b>	111°00'00" – 112°19'36"	-06°35'50" – -07°31'36"
<b>1c</b>	111°00'00" – 112°19'36"	-07°31'36" – -08°25'52"
<b>2a</b>	112°19'36" – 113°40'23"	-05°29'24" – -06°35'50"
<b>2b</b>	112°19'36" – 113°40'23"	-06°35'50" – -07°31'36"
<b>2c</b>	112°19'36" – 113°40'23"	-07°31'36" – -08°25'52"
<b>3a</b>	113°40'23" – 114°56'32"	-05°29'24" – -06°35'50"
<b>3b</b>	113°40'23" – 114°56'32"	-06°35'50" – -07°31'36"
<b>3c</b>	113°40'23" – 114°56'32"	-07°31'36" – -08°25'52"

Selanjutnya, juga dilakukan pembagian keadaan berdasarkan magnitudonya. Dalam katalog gempa yang digunakan pada penelitian ini, magnitudo gempa terkecil adalah  $M$  4 dan magnitudo terbesar adalah  $M$  7,8. Berdasarkan informasi ini, kejadian gempa di wilayah penelitian dapat dikategorikan ke dalam tiga keadaan:

1.  $M_1$  adalah gempa dengan magnitudo  $4 \leq M < 5$
2.  $M_2$  adalah gempa dengan magnitudo  $5 \leq M < 6$
3.  $M_3$  adalah gempa dengan magnitudo  $M \geq 6$

Pada kasus gempa 28 September 1998 sebelumnya, karena magnitudo gempa ini  $M$  6,5, gempa tersebut diklasifikasikan ke dalam gempa bermagnitudo  $M_3$ . Di wilayah penelitian pernah terjadi gempa dengan magnitudo  $M \geq 7$ . Namun, jumlah kejadian gempa dengan magnitudo  $M \geq 7$  di wilayah penelitian sangat terbatas sehingga dapat diasumsikan bahwa hasil analisis untuk gempa  $M \geq 6$  valid untuk kejadian gempa terbesar ( $M \geq 7$ ) di wilayah penelitian (Tsapanos dan Papadopoulou, 1999).

Dalam melakukan analisis kejadian gempa dengan rantai Markov ada hal yang perlu diperhatikan terkait dengan kelengkapan data dalam katalog. Meskipun katalog telah menyediakan data

gempa mulai dari tahun 1960, gempa dengan  $M \geq 4$  baru tersedia mulai tahun 1973. Oleh karena itu, dalam analisis secara spasial dan magnitudo untuk kasus gempa  $M \geq 3$  dan  $M \geq 4$ , data yang dianalisis adalah data setelah tahun 1973. Sementara untuk kasus gempa  $M \geq 5$ , data sudah tersedia sejak tahun 1960 sehingga analisis dapat dilakukan mulai dari tahun 1960.

Dalam upaya analisis bahaya kegempaan di wilayah penelitian, dilakukan analisis temporal untuk kejadian gempa bumi moderat berkedalaman dangkal, yakni gempa dengan  $M \geq 5$  dan kedalaman  $d < 70$  km, di setiap region yang telah ditentukan sebelumnya. Pemilihan kriteria ini berdasarkan pengamatan bahwa gempa yang sering menimbulkan kerusakan adalah gempa bermagnitudo moderat hingga besar dengan kedalaman fokus relatif dangkal.

Untuk melakukan analisis temporal, data gempa moderat dengan kedalaman dangkal dikelompokkan menurut region terjadinya. Selanjutnya, di setiap region dilakukan analisis mulai dari tahun 1960 hingga 2017. Periode tersebut dibagi ke dalam satuan waktu diskrit dengan interval 1 tahun. Alasannya, karakteristik kejadian gempa moderat di setiap region di wilayah penelitian umumnya terjadi sekitar satu tahun sekali. Interval waktu yang ditandai dengan terjadinya gempa moderat berkedalaman dangkal menunjukkan periode aktif dari suatu region. Periode aktif ini diberi nilai dengan angka “1” yang diadaptasi dari sistem bilangan biner. Sebaliknya, interval waktu yang tidak ditemukan kejadian gempa serupa diberi nilai “0” yang menunjukkan periode tidak aktif (inaktif) suatu region.

### **3.4.5 Perhitungan Probabilitas Transisi Spasial dan Magnitudo**

Setelah semua kejadian gempa ditentukan keadaannya berdasarkan region, maka dilakukan perhitungan frekuensi (jumlah kejadian) transisi dari satu region ke region berikutnya. Jumlah keseluruhan transisi adalah  $n - 1$ , dengan  $n$  adalah jumlah kejadian gempa bumi di wilayah penelitian. Untuk kejadian gempa yang terjadi pada region  $i$  yang selanjutnya disusul dengan kejadian gempa di region  $j$ , maka transisi kejadian gempa tersebut dihitung sebagai bagian dari elemen matriks  $N_{ij}$ , yaitu matriks frekuensi

transisi. Jadi, cara memperoleh informasi frekuensi transisi kejadian gempa dari suatu matriks adalah dari “baris” ke “kolom”.

Probabilitas transisi merupakan probabilitas proses Markov berada pada keadaan  $i$  jika selanjutnya akan memasuki keadaan  $j$ . Dalam kasus dua kejadian bersyarat, probabilitas transisi dapat dinyatakan dalam bentuk  $P(j|i)$ . Probabilitas transisi ini dinyatakan dengan sebuah matriks  $P_{ij}$  yang berukuran  $N \times N$ . Dengan  $N$  merupakan jumlah keadaan dalam sistem tersebut. Probabilitas transisi diperoleh dengan cara membagi frekuensi transisi  $n_{ij}$  dengan jumlah dari frekuensi di setiap barisnya  $n_i$ .

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum n_i} = Pr(j|i) \tag{3.1}$$

Dalam kasus ini,  $n_{ij}$  dapat ditinjau sebagai kejadian gempa bumi. Perhitungan probabilitas transisi merupakan metode paling penting dalam analisis rantai Markov karena dapat memberikan informasi mengenai jumlah transisi, migrasi, atau kunjungan kejadian gempa di setiap keadaannya. Transisi yang terjadi dapat diasumsikan sebagai suatu fenomena fisis (Tsapanos dan Papadopoulou, 1999).

Dalam penelitian ini akan dilakukan perhitungan probabilitas transisi untuk keadaan region dan magnitudo. Untuk keadaan region, matriks probabilitas transisi yang diperoleh adalah matriks  $9 \times 9$  karena wilayah penelitian dibagi menjadi 9 region seperti pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Format matriks probabilitas transisi untuk keadaan region dan elemennya

	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
<b>A1</b>	$p_{11}$	$p_{12}$	$p_{13}$	$p_{14}$	$p_{15}$	$p_{16}$	$p_{17}$	$p_{18}$	$p_{19}$
<b>A2</b>	$p_{21}$	$p_{22}$	$p_{23}$	$p_{24}$	$p_{25}$	$p_{26}$	$p_{27}$	$p_{28}$	$p_{29}$
<b>A3</b>	$p_{31}$	$p_{32}$	$p_{33}$	$p_{34}$	$p_{35}$	$p_{36}$	$p_{37}$	$p_{38}$	$p_{39}$
<b>B1</b>	$p_{41}$	$p_{42}$	$p_{43}$	$p_{44}$	$p_{45}$	$p_{46}$	$p_{47}$	$p_{48}$	$p_{49}$
<b>B2</b>	$p_{51}$	$p_{52}$	$p_{53}$	$p_{54}$	$p_{55}$	$p_{56}$	$p_{57}$	$p_{58}$	$p_{59}$
<b>B3</b>	$p_{61}$	$p_{62}$	$p_{63}$	$p_{64}$	$p_{65}$	$p_{66}$	$p_{67}$	$p_{68}$	$p_{69}$
<b>C1</b>	$p_{71}$	$p_{72}$	$p_{73}$	$p_{74}$	$p_{75}$	$p_{76}$	$p_{77}$	$p_{78}$	$p_{79}$
<b>C2</b>	$p_{81}$	$p_{82}$	$p_{83}$	$p_{84}$	$p_{85}$	$p_{86}$	$p_{87}$	$p_{88}$	$p_{89}$
<b>C3</b>	$p_{91}$	$p_{92}$	$p_{93}$	$p_{94}$	$p_{95}$	$p_{96}$	$p_{97}$	$p_{98}$	$p_{99}$

Dengan demikian, jumlah probabilitas transisi untuk setiap barisnya adalah 1. Probabilitas transisi bernilai  $0 \leq p_{ij} \leq 1$  atau jika dinyatakan dalam satuan persen akan bernilai  $0 \leq p_{ij} \leq 100$ .

Untuk kasus gempa sesar darat, analisis dilakukan pada kasus gempa dengan batas magnitudo yang berbeda, yaitu  $M \geq 3$ ,  $M \geq 4$ , dan  $M \geq 5$ , sebab umumnya gempa tersebut memiliki karakteristik magnitudo relatif kecil. Sementara itu, untuk kasus gempa subduksi analisis dilakukan dengan batas magnitudo  $M \geq 4$ ,  $M \geq 5$ , dan  $M \geq 6$  karena umumnya magnitudo gempa yang dihasilkan relatif lebih besar.

Selanjutnya, untuk keadaan magnitudo akan diperoleh matriks probabilitas transisi berupa matriks  $3 \times 3$  (Tabel 3.6) karena terdapat 3 keadaan magnitudo yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 3.6 Format matriks probabilitas transisi untuk keadaan magnitudo dan elemennya

	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>
<b>M1</b>	$p_{11}$	$p_{12}$	$p_{13}$
<b>M2</b>	$p_{21}$	$p_{22}$	$p_{23}$
<b>M3</b>	$p_{31}$	$p_{32}$	$p_{33}$

Jika setiap elemen dari matriks frekuensi transisi dijumlahkan setiap barisnya, lalu dibagi dengan jumlah keseluruhan transisi yang terjadi, akan diperoleh vektor probabilitas marginal (*Margin Probability Vector/MPV*) atau vektor probabilitas tetap (*Fixed Probability Vector/FPV*). Vektor ini merupakan matriks berukuran  $3 \times 1$ . Berdasarkan persamaan (2.33) yang diturunkan dari teorema Bayes tentang kejadian bersyarat dan dua buah kejadian yang saling lepas, maka probabilitas terjadinya keadaan  $j$  setelah terjadi keadaan  $i$  adalah probabilitas terjadinya keadaan  $j$  tersebut. Sebagai contoh, probabilitas terjadinya gempa di zona A1 setelah terjadinya gempa di zona B1 adalah probabilitas terjadinya gempa di zona A1 tersebut. Hal ini berlaku dengan asumsi bahwa terjadinya keadaan  $i$  tidak dipengaruhi oleh keadaan  $j$  dan sebaliknya.

Untuk memudahkan dalam penyajian informasi tentang transisi kejadian gempa paling dominan dari satu region ke region berikutnya, maka dibuat diagram transisi. Diagram transisi ini terdiri dari lingkaran-lingkaran berkode setiap keadaan, yaitu masing-

masing region. Selanjutnya, antarlingkaran dihubungkan dengan tanda panah yang menunjukkan arah transisi dari region satu ke region lainnya. Dalam penelitian ini transisi yang ditampilkan dalam diagram transisi hanya 2 transisi, yakni dua transisi dengan probabilitas terbesar di masing-masing region. Hal ini bertujuan mengurangi jumlah transisi yang ditampilkan sehingga tidak membuat tampilan diagram menjadi rumit. Dengan 9 region, maka terdapat 9 kemungkinan transisi yang terjadi di setiap region dan 81 kemungkinan keseluruhan transisi yang terjadi.

### 3.4.6 Pengujian Hipotesis

Untuk mengetahui transisi kejadian gempa di wilayah penelitian merupakan sebuah proses Markov atau bukan, maka digunakan pengujian hipotesis dengan metode uji Chi Kuadrat. Pemilihan uji Chi Kuadrat dalam penelitian ini karena uji ini mampu diterapkan untuk keadaan yang bersifat diskrit seperti dalam kasus rantai Markov. Dalam penelitian ini, uji Chi Kuadrat tidak dilakukan pada analisis temporal dan hanya dilakukan pada analisis spasial serta magnitudo. Hal ini disebabkan analisis rantai Markov secara temporal hanya melibatkan dua keadaan, yaitu aktif dan tidak aktif.

Dalam melakukan uji Chi Kuadrat, tahap pertama yang dilakukan adalah perhitungan matriks probabilitas transisi harapan maupun matriks frekuensi transisi harapan. Matriks probabilitas transisi harapan (seperti halnya matriks probabilitas pengamatan) merupakan matriks berukuran  $9 \times 9$  untuk analisis spasial dan  $3 \times 3$  untuk analisis magnitudo. Karena probabilitas transisi kejadian  $i$  ke kejadian  $j$  adalah probabilitas terjadinya kejadian  $j$  tersebut, semua nilai elemen matriks probabilitas transisi harapan pada baris yang sama akan memiliki nilai yang sama, yakni elemen dari masing-masing baris dalam vektor probabilitas tetap.

Sebagai contoh, probabilitas harapan terjadinya transisi kejadian gempa dari region B1 ke B2 adalah sama dengan probabilitas terjadinya gempa di region B2. Hal yang sama juga berlaku untuk menentukan probabilitas harapan terjadinya transisi gempa dari region A1, A2, A3, B2, B3, C1, C2, maupun C3 ke region B2, yaitu probabilitas terjadinya gempa di region B2 itu sendiri. Hal ini sesuai dengan sifat matriks probabilitas transisi dalam

rantai Markov dan teorema Bayes yang telah dibuktikan sebelumnya, yaitu:

$$P_{ij} = Pr\{j|i\} = Pr(j) \quad (3.2)$$

Selanjutnya, setiap elemen matriks probabilitas transisi harapan dikalikan dengan jumlah elemen matriks frekuensi transisi pengamatan di setiap barisnya sehingga diperoleh matriks frekuensi transisi harapan. Matriks frekuensi transisi harapan memberikan gambaran tentang frekuensi transisi yang diharapkan terjadi jika seandainya kejadian gempa saat ini tidak dipengaruhi kejadian gempa sebelumnya dan kejadian gempa berikutnya tidak dipengaruhi kejadian gempa saat ini.

Matriks frekuensi transisi harapan dapat dibandingkan dengan matriks frekuensi transisi pengamatan untuk menguji hipotesis nol bahwa kejadian gempa di wilayah penelitian bersifat acak dan tidak saling mempengaruhi. Hal ini dilakukan dengan menghitung nilai Chi Kuadrat. Nilai Chi Kuadrat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$\chi^2 = \sum \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad (3.3)$$

dengan  $O_{ij}$  adalah elemen matriks frekuensi transisi pengamatan dan  $E_{ij}$  adalah elemen matriks frekuensi transisi harapan.

Kemudian, nilai Chi Kuadrat hasil perhitungan ini dibandingkan dengan nilai Chi Kuadrat kritis yang dapat dilihat pada Lampiran 1. Untuk mengetahui nilai Chi Kuadrat kritis, diperlukan informasi tentang derajat kebebasan (*degree of freedom*) dan taraf signifikansi (*level of significant*) yang digunakan. Dalam penelitian ini digunakan taraf signifikansi  $\alpha = 5\%$ . Sementara itu, dalam rantai Markov jumlah derajat kebebasannya sebesar  $(N - 1)^2$ . Dengan  $N$  merupakan jumlah keadaan dalam rantai Markov tersebut. Dalam perhitungan derajat kebebasan, jumlah keadaan dikurangi dengan 1 sebelum dikuadratkan karena dalam setiap barisnya akan kehilangan satu derajat kebebasan. Hal ini disebabkan jumlah probabilitas di setiap barisnya sama dengan 1 (Polimenakos, 1995, Davis, 1986). Dalam analisis secara spasial penelitian ini terdapat 9 keadaan sehingga diperoleh nilai derajat kebebasan sebesar  $(9 - 1)^2 = 64$  sedangkan untuk analisis secara magnitudo diperoleh  $(3 - 1)^2 = 4$  derajat kebebasan.

Apabila nilai Chi Kuadrat hasil perhitungan lebih kecil daripada nilai Chi Kuadrat kritis, hipotesis nol diterima. Hal ini berarti bahwa kejadian gempa yang terjadi di wilayah penelitian bersifat acak. Artinya, tidak ada keterkaitan antara kejadian gempa di suatu region dengan region lainnya. Sebaliknya, jika nilai Chi Kuadrat hasil perhitungan lebih besar daripada nilai Chi Kuadrat kritis, hipotesis nol ditolak. Dengan kata lain, terdapat korelasi secara spasial maupun magnitudo antara kejadian gempa saat ini dengan kejadian gempa selanjutnya (Polimenakos, 1995).

### 3.4.7 Perhitungan Probabilitas Transisi Temporal

Dalam analisis rantai Markov kejadian gempa bumi secara temporal, matriks frekuensi transisi yang digunakan adalah matriks dua keadaan, yakni keadaan 0 (periode inaktif) dan keadaan 1 (periode aktif). Oleh karena itu, baik matriks frekuensi transisi dan probabilitas transisi dalam analisis temporal ini merupakan matriks berukuran  $2 \times 2$ . Dengan cara yang sama seperti dalam analisis secara spasial dan magnitudo, matriks probabilitas transisi dalam kasus temporal diperoleh dengan cara membagi setiap elemen matriks frekuensi transisi dengan jumlah elemen matriks pada setiap barisnya.

Analisis temporal dengan sistem dua keadaan ini memungkinkan dilakukannya perhitungan probabilitas transisi dari keadaan periode aktif menjadi inaktif maupun sebaliknya (Tsapanos dan Papadopoulou, 1999). Berdasarkan hal ini, akan terdapat empat kemungkinan transisi keadaan yang terjadi, yaitu dari keadaan 0 menjadi 0 ( $P_{00}$ ) yaitu transisi dari periode inaktif menjadi inaktif, dari keadaan 0 menjadi 1 ( $P_{01}$ ) yaitu transisi dari periode inaktif menjadi aktif, dari keadaan 1 menjadi 0 ( $P_{10}$ ) yaitu transisi dari periode aktif menjadi inaktif, dan dari keadaan 1 menjadi 1 ( $P_{11}$ ) yaitu periode aktif yang diikuti dengan periode aktif.

Bentuk umum dari matriks probabilitas transisi dua keadaan ini dapat dilihat pada Tabel 3.7. Dengan menggunakan sifat dari matriks probabilitas transisi tersebut diperoleh bahwa:

$$P_{10} + P_{11} = 1 \quad (3.4)$$

Tabel 3.7 Format matriks probabilitas transisi untuk keadaan periode aktif dan inaktif beserta elemennya

	<b>0</b>	<b>1</b>
<b>0</b>	$P_{00}$	$P_{01}$
<b>1</b>	$P_{10}$	$P_{11}$

Selanjutnya, dengan menghitung kebalikan probabilitas transisi dari keadaan 1 menjadi 0 ( $\frac{1}{P_{10}}$ ) akan diperoleh durasi rata-rata periode aktif di suatu region. Dengan cara yang sama, kebalikan probabilitas transisi dari keadaan 0 menjadi 1 ( $\frac{1}{P_{01}}$ ) akan didapatkan durasi rata-rata periode inaktif di suatu region. Durasi rata-rata periode aktif maupun inaktif yang diperoleh ini dinyatakan dalam satuan tahun.

### 3.4.8 Interpretasi Data

Setelah menganalisis kejadian gempa bumi dengan rantai Markov, tahap selanjutnya yang dilakukan adalah interpretasi. Interpretasi khususnya ditujukan pada matriks probabilitas transisi dan kemungkinan adanya migrasi kejadian gempa di wilayah penelitian. Dalam tahap interpretasi perlu ditinjau kembali hasil uji hipotesis dengan metode Chi Kuadrat. Apabila hipotesis ditolak, kemungkinan besar terdapat keterkaitan kejadian gempa di wilayah penelitian.

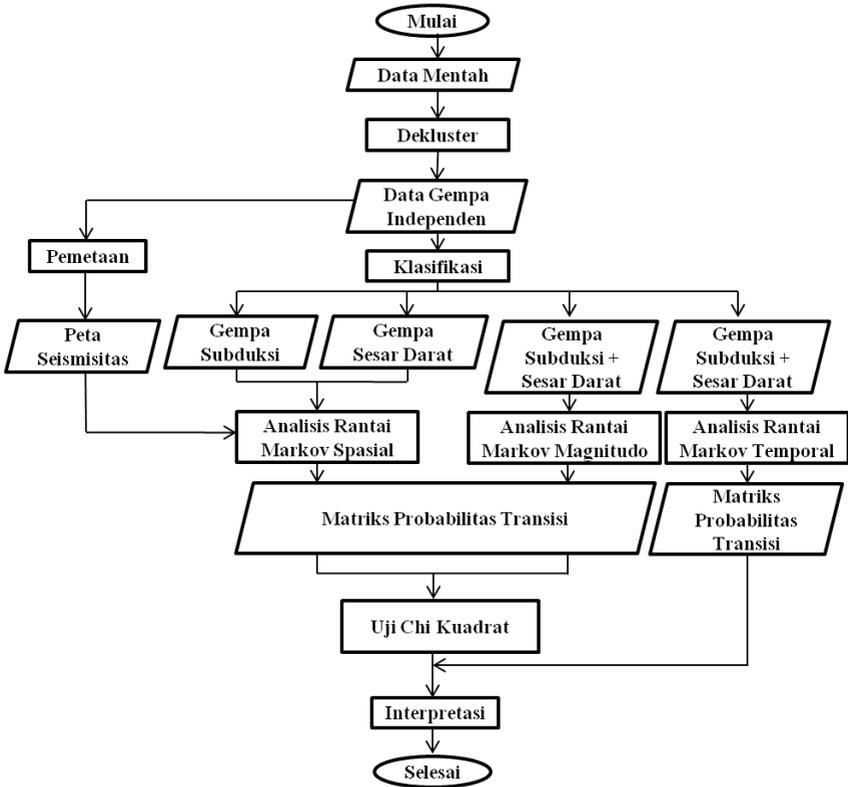
Untuk memahami keterkaitan transisi kejadian gempa secara spasial dan magnitudo dengan keadaan fisis di wilayah penelitian, maka frekuensi kejadian gempa di setiap region dianalisis. Berdasarkan informasi frekuensi kejadian gempa di setiap region, dilakukan korelasi dengan keberadaan struktur geologi aktif di region tersebut maupun kondisi seismotektoniknya. Hal ini mampu menjelaskan alasan tentang adanya suatu region yang kemungkinan sering “dikunjungi” atau menjadi tujuan transisi setelah terjadi gempa di region lainnya.

Penjelasan fisis transisi kejadian gempa secara spasial maupun magnitudo juga dapat dikorelasikan dengan teori bingkis elastis maupun hipotesis kesenjangan gempa yang telah berkembang luas. Korelasi hasil analisis dengan studi sebelumnya mengenai tomografi seismik, pemodelan gravitasi, pengukuran kecepatan pergeseran

dengan GPS, maupun kala ulang kejadian gempa di wilayah penelitian diharapkan mampu menjelaskan hasil penelitian ini.

### 3.5 Diagram Alir Penelitian

Secara umum, tahap-tahap dalam penelitian ini dapat ditampilkan dalam diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian