UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN METODE SINGLE-LINK CLUSTERING ADAPTIF UNTUK DISKRIMINASI CLUSTER FORESHOCK-MAINSHOCK
PADA PERAMALAN GEMPA BUMI JANGKA PENDEK
ADITYA A ZEIN, Dr. Agfianto Eko Putra, M.Si., Prof. Drs. Edi Winarko, M.Sc.,Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL . . . . . **i**

HALAMAN JUDUL . . . . . **ii**

HALAMAN PENGESAHAN . . . . . **iii**

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI . . . . . **iv**

PRAKATA . . . . . **v**

DAFTAR ISI . . . . . **vii**

DAFTAR GAMBAR . . . . . **xi**

DAFTAR TABEL . . . . . **xiii**

INTISARI . . . . . **xv**

ABSTRACT . . . . . **xvi**

BAB I PENDAHULUAN **1**

1.1 Latar Belakang Masalah 1

1.2 Rumusan Masalah 5

1.3 Batasan Masalah 5

1.4 Tujuan 5

1.5 Manfaat 6

BAB II TINJAUAN PUSTAKA **7**

BAB III LANDASAN TEORI **14**

3.1 Clustering 14

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN METODE SINGLE-LINK CLUSTERING ADAPTIF UNTUK DISKRIMINASI CLUSTER FORESHOCK-MAINSHOCK
PADA PERAMALAN GEMPA BUMI JANGKA PENDEK
ADITYA A ZEIN, Dr. Agfianto Eko Putra, M.Si., Prof. Drs. Edi Winarko, M.Sc.,Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.2 Adaptive Radius $R(M)$ . . . 15
3.3 Formula Haversine . . . 16
3.4 SLC (*Single-Link Clustering*) . . . 17
3.4.1 Konsep SLC . . . 19
3.4.2 Ukuran jarak ruang-waktu . . . 20
3.4.3 SLC *baseline*: ambang tetap . . . 21
3.4.4 SLC adaptif berbasis magnitudo . . . 22
3.4.5 Pembentukan klaster SLC . . . 23
3.5 *Machine Learning* . . . 24
3.6 *Rolling out-of-sample Method* . . . 24
3.7 *Non-Linear Logistic Regression* . . . 26
3.8 Metode Evaluasi . . . 28
3.8.1 *Confusion Matrix* . . . 29
3.8.2 ROC-AUC . . . 29
3.8.3 PR–AUC / *Average Precision* . . . 31
3.8.4 *LogLoss* . . . 32
3.8.5 *Brier Score* . . . 32
3.8.6 *Expected Calibration Error* (ECE) . . . 33

BAB IV METODOLOGI PENELITIAN . . . 35
4.1 Analisis dan Perancangan Sistem . . . 35
4.2 Akuisisi Dataset . . . 35
4.3 Data Preprocessing . . . 38
4.3.1 Standarisasi dan Seleksi Atribut Inti . . . 38
4.3.2 Penanganan *Missing Value* (*listwise deletion*) . . . 38
4.3.3 Deteksi dan Eliminasi Duplikasi Data . . . 39
4.4 SLC . . . 39
4.4.1 Penetapan Parameter dan Fungsi Pendukung SLC . . . 40
4.4.2 Aturan Konektivitas SLC Adaptif . . . 41
4.4.3 Penentuan Konektivitas Berbasis Kedekatan *Spatio-temporal* dan $R(M)$ . . . 42
4.4.4 Konstruksi Matriks *Precomputed* secara *Chunked* . . . 43
4.4.5 Tahap Akhir Klastering dan Penetapan *cluster_id* . . . 43
4.5 Skenario Perbandingan *Linkage Clustering* . . . 44
4.6 Pembentukan Unit Prediksi (*prefix*) dan Penetapan Label Target . . . 46

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN METODE SINGLE-LINK CLUSTERING ADAPTIF UNTUK DISKRIMINASI CLUSTER FORESHOCK-MAINSHOCK
PADA PERAMALAN GEMPA BUMI JANGKA PENDEK
ADITYA A ZEIN, Dr. Agfianto Eko Putra, M.Si., Prof. Drs. Edi Winarko, M.Sc.,Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

4.6.1 Pembentukan Unit Prediksi (*prefix*) Berbasis Klaster 46
4.6.2 Penetapan Label Target *Foreshock–Mainshock Multi-threshold* 47
4.7 Ekstraksi dan Transformasi Fitur 48
4.7.1 Ekstraksi Fitur 48
4.7.2 Transformasi Fitur 49
4.8 Split Dataset menggunakan *Rolling Out-of-Sample* 50
4.9 Regresi Logistik *Non-linear* Berbasis *Spline* 51
4.10 Evaluasi Model 53

BAB V IMPLEMENTASI 55
5.1 Lingkungan Implementasi dan Sumber Data 55
5.2 Implementasi Preprocessing Data 57
5.3 Implementasi Pembentukan Klaster (*Single-Link Clustering Adaptif*) . 58
5.3.1 Masukan dan Konstanta Implementasi 58
5.3.2 Perhitungan Jarak *Spatio-temporal* 60
5.3.3 Aturan Konektivitas pada SLC Baseline 61
5.3.4 Aturan Konektivitas pada SLC Adaptif 61
5.3.5 Ringkasan Perbedaan Implementasi Baseline dan Adaptif . . 63
5.3.6 Ilustrasi Perhitungan Konektivitas 64
5.3.7 Pembentukan Matriks *Precomputed* 67
5.3.8 Komputasi Matriks secara *Chunked* 68
5.3.9 Klasterisasi dan Penetapan *cluster_id* 69
5.4 Implementasi Skenario Perbandingan *Linkage Clustering* 70
5.5 Implementasi Pembentukan Prefix dan Label 72
5.6 Implementasi Ekstraksi Fitur dan Transformasi Fitur 74
5.7 Implementasi Split Data dan Model Probabilistik 76
5.7.1 Implementasi Split Dataset 77
5.7.2 Implementasi Model Probabilistik 78
5.8 Implementasi Evaluasi Model 80

BAB VI HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN 84
6.1 Hasil Akuisisi dan Preprocessing Data 84
6.2 Hasil Pembentukan Klaster 85
6.2.1 Hasil Pembentukan Klaster SLC Adaptif 86
6.2.2 Perbandingan Persebaran Klaster Berdasarkan *Linkage* 87

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN METODE SINGLE-LINK CLUSTERING ADAPTIF UNTUK DISKRIMINASI CLUSTER FORESHOCK-MAINSHOCK PADA PERAMALAN GEMPA BUMI JANGKA PENDEK
ADITYA A ZEIN, Dr. Agfianto Eko Putra, M.Si., Prof. Drs. Edi Winarko, M.Sc.,Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

6.3 Hasil Pembentukan Prefix dan Penetapan Label 89
6.4 Hasil Ekstraksi dan Transformasi Fitur 91
6.5 Split Dataset dan Hasil Prediksi Model 92
6.6 Hasil Evaluasi Model pada Skema *Rolling Out-of-Sample* 94
6.6.1 Evaluasi Model SLC Adaptif 94
6.6.2 Perbandingan Evaluasi Model Berdasarkan *Linkage* 97
6.7 Evaluasi Kebijakan Alarm dan Kalibrasi Probabilitas 100
6.7.1 Evaluasi Kebijakan Alarm pada Model SLC Adaptif 100
6.7.2 Evaluasi Kalibrasi Probabilitas pada Model SLC Adaptif . . . 102
6.7.3 Perbandingan Kalibrasi Probabilitas Berdasarkan *Linkage* . . 103
6.8 Uji Signifikansi Hasil Evaluasi 105
6.9 Ablation Study 107
6.9.1 Implementasi model tanpa Efek Acak Klaster pada Skema *Rolling Out-of-Sample* 108
6.9.2 Implementasi *No Floor* pada Radius Adaptif 109
6.9.3 Implementasi Prediksi Probabilitas tanpa Transformasi Fitur . 111
6.10 Pembahasan Hasil dan Implikasi 113
6.11 Limitasi Metode 114

BAB VII KESIMPULAN 116
7.1 Kesimpulan 116
7.2 Saran 116

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN METODE SINGLE-LINK CLUSTERING ADAPTIF UNTUK DISKRIMINASI CLUSTER FORESHOCK-MAINSHOCK
PADA PERAMALAN GEMPA BUMI JANGKA PENDEK
ADITYA A ZEIN, Dr. Agfianto Eko Putra, M.Si., Prof. Drs. Edi Winarko, M.Sc.,Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

1.1 Organisasi spasial *foreshock*. 2
1.2 Perbandingan ambang tetap dan ambang adaptif. 4

3.1 Posisi SLC dalam alur identifikasi klaster hingga diskriminasi klaster dalam penelitian. 15
3.2 Representasi kejadian gempa sebagai titik. 18
3.3 Penentuan konektivitas antarkejadian. 18
3.4 Pembentukan klaster berdasarkan prinsip *single-link*. 19
3.5 Ilustrasi skema pada validasi temporal *rolling out-of-sample* (Vu et al., 2022). 26
3.6 Ilustrasi kurva ROC dan nilai AUC. 31

4.1 Alur umum penelitian. 35
4.2 Profil awal dataset Sumatra. 37
4.3 Profil awal dataset Chile. 37
4.4 Alur umum tahap pembentukan klaster SLC adaptif. 40
4.5 Alur penentuan konektivitas antarkejadian. 42
4.6 Alur pembentukan klaster hingga penetapan *cluster_id*. 44
4.7 Alur pembentukan unit prediksi berbasis *prefix*. 47
4.8 Alur umum pemodelan probabilistik dengan regresi logistik *non-linear* berbasis *spline*. 53

5.1 Cuplikan kode *preprocessing* data. 57
5.2 Pseudocode konstanta umum dan parameter konektivitas. 59
5.3 Pseudocode perhitungan jarak *spatio-temporal*. 60
5.4 Pseudocode aturan konektivitas SLC baseline. 61
5.5 Pseudocode perhitungan radius adaptif. 62
5.6 Pseudocode aturan konektivitas SLC adaptif. 63
5.7 Perhitungan manual d_{ST}. 65

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN METODE SINGLE-LINK CLUSTERING ADAPTIF UNTUK DISKRIMINASI CLUSTER FORESHOCK-MAINSHOCK PADA PERAMALAN GEMPA BUMI JANGKA PENDEK
ADITYA A ZEIN, Dr. Agfianto Eko Putra, M.Si., Prof. Drs. Edi Winarko, M.Sc.,Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

5.8 Perhitungan manual radius adaptif. 66
5.9 Pseudocode pembentukan matriks *precomputed*. 68
5.10 Pseudocode komputasi matriks secara *chunked*. 69
5.11 Pseudocode klasterisasi dan penetapan `cluster_id`. 70
5.12 Cuplikan pseudocode implementasi *adaptive* pada (a) *Complete-Link Clustering* (CLC) dan (b) *Average-Link Clustering* (ALC). 71
5.13 Cuplikan implementasi pembentukan *prefix* dan label target. 73
5.14 Cuplikan implementasi ekstraksi fitur pada level *prefix*. 75
5.15 Cuplikan implementasi transformasi fitur. 76
5.16 Cuplikan implementasi pembagian data dengan skema *rolling out-of-sample*. 77
5.17 Cuplikan implementasi pelatihan model GAM. 79
5.18 Cuplikan implementasi evaluasi metrik utama. 81
5.19 Cuplikan implementasi evaluasi kalibrasi. 82

6.1 Perbandingan deret waktu magnitudo gempa pada *dataset* mentah Sumatra dan Chile. 84
6.2 Perbandingan hasil *clustering baseline* dan adaptif. 86
6.3 Perbandingan persebaran klaster *adaptive* berdasarkan metode *linkage*. 88
6.4 Peta keluaran probabilitas dan kejadian target aktual terpilih pada data Sumatra. 97
6.5 Kurva tingkat alarm pada data Sumatra. 101

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN METODE SINGLE-LINK CLUSTERING ADAPTIF UNTUK DISKRIMINASI CLUSTER FORESHOCK-MAINSHOCK
PADA PERAMALAN GEMPA BUMI JANGKA PENDEK
ADITYA A ZEIN, Dr. Agfianto Eko Putra, M.Si., Prof. Drs. Edi Winarko, M.Sc.,Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

2.1 Tinjauan Pustaka 11

4.1 Tingkat fungsionalitas dataset. 36
4.2 Perbedaan aturan konektivitas SLC baseline dan SLC adaptif. 41
4.3 Hasil uji sensitivitas batas bawah $R(M)$. 43
4.4 Ringkasan strategi *linkage clustering* yang dibandingkan. 45
4.5 Ringkasan definisi fitur yang digunakan. 49
4.6 Ringkasan transformasi fitur yang digunakan. 50
4.7 Rangkuman hasil pembagian data *rolling out-of-sample*. 51

5.1 Ringkasan *library* dan fungsi penggunaannya pada penelitian 56
5.2 Ringkasan hasil *preprocessing* data 58
5.3 Perbedaan implementasi SLC baseline dan SLC adaptif 63
5.4 Data pasangan kejadian untuk ilustrasi konektivitas 64
5.5 Komponen perhitungan pasangan kejadian 65
5.6 Keputusan konektivitas pada baseline dan adaptif 67
5.7 Fungsi metrik evaluasi model 83

6.1 Atribut akhir hasil *preprocessing* data 85
6.2 Ringkasan statistik klaster *baseline* dan adaptif 86
6.3 Ringkasan jumlah dan ukuran klaster berdasarkan metode *linkage* . . 88
6.4 Ringkasan hasil pembentukan *prefix* dan distribusi label target 90
6.5 Ringkasan statistik fitur hasil ekstraksi pada data *prefix* 91
6.6 Ringkasan statistik fitur hasil transformasi untuk pemodelan 92
6.7 Ringkasan skema *rolling out-of-sample* pada data Sumatra 93
6.8 Ringkasan *fold* valid pada skema *rolling out-of-sample* 93
6.9 Ringkasan metrik evaluasi agregat pada skema *rolling out-of-sample* . 95
6.10 Contoh keluaran probabilitas dan kejadian target aktual pada data Sumatra 95

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN METODE SINGLE-LINK CLUSTERING ADAPTIF UNTUK DISKRIMINASI CLUSTER FORESHOCK-MAINSHOCK PADA PERAMALAN GEMPA BUMI JANGKA PENDEK
ADITYA A ZEIN, Dr. Agfianto Eko Putra, M.Si., Prof. Drs. Edi Winarko, M.Sc.,Ph.D.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

6.11 Perbandingan evaluasi model *baseline* berdasarkan metode *linkage* . . 98
6.12 Perbandingan evaluasi model adaptif berdasarkan metode *linkage* . . 99
6.13 Ringkasan evaluasi kebijakan alarm pada data Sumatra SLC *baseline* 100
6.14 Ringkasan evaluasi kebijakan alarm pada data Sumatra SLC adaptif . 101
6.15 Ringkasan metrik kalibrasi probabilitas pada data Sumatra dan Chile. 103
6.16 Perbandingan kalibrasi model *baseline* berdasarkan metode *linkage* . 104
6.17 Perbandingan kalibrasi model *adaptive* berdasarkan metode *linkage* . 104
6.18 Hasil uji signifikansi berpasangan pada data Sumatra. 106
6.19 Hasil uji signifikansi berpasangan pada data Chile. 107
6.20 Perbandingan metrik evaluasi dengan dan tanpa ε_{cl}. 108
6.21 Perbandingan metrik kalibrasi dengan dan tanpa ε_{cl}. 109
6.22 Perbandingan metrik evaluasi SLC adaptif dengan dan tanpa batas bawah radius. 110
6.23 Perbandingan metrik kalibrasi SLC adaptif dengan dan tanpa batas bawah radius. 110
6.24 Perbandingan evaluasi model dengan dan tanpa transformasi fitur . . 111
6.25 Perbandingan kalibrasi model dengan dan tanpa transformasi fitur . . 112