

SKRIPSI

**PRAKIRAAN KEMUNGKINAN TERJADINYA GEMPA BUMI
MENGUNAKAN METODE *TIME SERIES FORECASTING* DI
PULAU SULAWESI DAN SEKITARNYA**

Disusun dan diajukan oleh:

**MUHAMMAD ALWI KAYYUM
D121181003**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

PRAKIRAAN KEMUNGKINAN TERJADINYA GEMPA BUMI MENGUNAKAN METODE *TIME SERIES FORECASTING* DI PULAU SULAWESI DAN SEKITARNYA

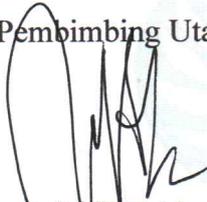
Disusun dan diajukan oleh

**Muhammad Alwi Kayyum
D121181003**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Informatika
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 21 Agustus 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

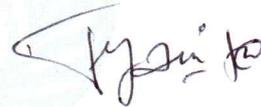
Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Eng. Zulkfli Tahir, S.T., M.Sc.
NIP. 198404032010121004

Pembimbing Pendamping,



Ir. Tyanita Putri Marindah Wardhani, S.T., M.Inf.
NIP. 198703092023036001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Ir. Indrabayu, S.T., M.T., M.Bus.Sys., IPM, ASEAN. Eng.
NIP. 197507162002121004

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;
Nama : Muhammad Alwi Kayyum
NIM : D121181003
Program Studi : Teknik Informatika
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Prakiraan Kemungkinan Terjadinya Gempa Bumi Menggunakan Metode Time Series Forecasting Di Pulau Sulawesi Dan Skitarnya

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 7 Oktober 2024

Yang Menyatakan



Muhammad Alwi Kayyum

ABSTRAK

MUHAMMAD ALWI KAYYUM. *Prakiraan Kemungkinan Terjadinya Gempa Bumi Menggunakan Metode Time Series Forecasting Di Pulau Sulawesi Dan Sekitarnya* (dibimbing oleh Dr. Eng. Zulkifli Tahir, S.T., M.Sc. dan Ir. Tyanita Puti Marindah Wardhani, S.T., M.Inf.)

Gempa bumi merupakan ancaman serius di Indonesia, khususnya di Pulau Sulawesi yang terletak di zona subduksi empat lempeng tektonik. Frekuensi tinggi gempa bumi di wilayah ini menuntut adanya upaya mitigasi yang efektif, salah satunya melalui prakiraan kejadian gempa. Pendekatan prediktif yang akurat sangat penting untuk meminimalkan dampak bencana. Oleh karena itu, penelitian ini fokus pada pengembangan model *Long Short Term Memory (LSTM)* untuk prakiraan gempa bumi di Pulau Sulawesi dan sekitarnya menggunakan data seismik historis.

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang dan membangun model *LSTM* yang mampu memprakirakan kejadian gempa bumi di Pulau Sulawesi, serta menganalisis hasil prakiraan dari model tersebut. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan pemahaman pada penggunaan model *LSTM* untuk prakiraan gempa, yang pada gilirannya dapat membantu otoritas dalam pengambilan keputusan mitigasi bencana.

Metode penelitian melibatkan penggunaan data historis gempa bumi selama 15 tahun yang diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) serta *United States Geological Survey (USGS)*. Data yang digunakan mencakup variabel lokasi (*latitude* dan *longitude*), kedalaman (*depth*), dan magnitudo (*mag*). Penelitian ini dilakukan dengan dua pendekatan. Pendekatan pertama menggunakan *time series forecasting* dengan model *LSTM*, dan pendekatan kedua menggunakan klusterisasi *K-Means* yang juga memanfaatkan model *LSTM* untuk memprakirakan kemungkinan terjadinya gempa bumi berdasarkan hasil klusterisasi wilayah. Evaluasi model dilakukan dengan metrik *Root Mean Squared Error (RMSE)*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa model *LSTM* yang dikembangkan dengan pendekatan *time series* memiliki nilai *RMSE* sebesar 1.576601. Kemudian, pendekatan klusterisasi memberikan hasil yang lebih baik, dengan rata-rata *RMSE* untuk semua region sebesar 0.882, yang termasuk kategori “baik” menurut Davtalab (2023). Grafik perbandingan antara data aktual dan prakiraan menunjukkan bahwa model mampu mereplikasi pola seismik dengan baik jika dibandingkan dengan kombinasi *hyperparameter* lainnya.

Kata Kunci: Gempa, *LSTM*, *RMSE*, Sulawesi, *Time Series*

ABSTRACT

MUHAMMAD ALWI KAYYUM. *Forecasting the Possible Occurrence of Earthquakes Using the Time Series Forecasting Method on the Island of Sulawesi and its Surroundings* (supervised by Dr. Eng. Zulkifli Tahir, S.T., M.Sc. and Ir. Tyanita Puti Marindah Wardhani, S.T., M.Inf.)

Earthquakes are a serious threat in Indonesia, particularly on Sulawesi Island, which is situated in a subduction zone involving four tectonic plates. The high frequency of earthquakes in this region necessitates effective mitigation efforts, one of which is earthquake forecasting. Accurate predictive approaches are crucial for minimizing the impact of such disasters. Therefore, this study focuses on developing a Long Short-Term Memory (LSTM) model for earthquake forecasting on Sulawesi Island and its surrounding areas using historical seismic data.

The aim of this research is to design and build an LSTM model capable of forecasting earthquake occurrences on Sulawesi Island, as well as to analyze the forecast results from this model. This study is expected to make a significant contribution to the understanding of using LSTM models for earthquake prediction, which in turn could assist authorities in disaster mitigation decision-making.

The research methodology involves using historical earthquake data spanning 15 years obtained from the Meteorology, Climatology, and Geophysical Agency (BMKG) and the United States Geological Survey (USGS). The data includes variables such as location (latitude and longitude), depth, and magnitude. The study employs two approaches: the first approach utilizes time series forecasting with the LSTM model, while the second approach uses K-Means clustering, which also leverages the LSTM model to forecast the likelihood of earthquakes based on regional clustering results. Model evaluation is conducted using the Root Mean Squared Error (RMSE) metric.

The results indicate that the LSTM model developed with the time series forecasting approach achieved an RMSE value of 1.576601. The clustering approach yielded better results, with an average RMSE of 0.882 across all regions, categorized as “good” according to Davtalab (2023). Comparative graphs between actual data and forecasts demonstrate that the model effectively replicates seismic patterns compared to other hyperparameter combinations.

Keywords: Earthquake, LSTM, RMSE, Sulawesi, Time Series

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
KATA PENGANTAR.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan.....	3
1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan.....	3
1.5 Ruang Lingkup/Asumsi perancangan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Konsep Gempa Bumi.....	5
2.2 Time Series Forecasting.....	10
2.3 K-Means.....	15
2.4 Parameter Evaluasi.....	15
BAB 3 METODE PENELITIAN/PERANCANGAN.....	17
3.1 Lokasi Penelitian.....	17
3.2 Area Studi Kasus.....	17
3.3 Instrumen Penelitian.....	19
3.4 Teknik Pengambilan Data.....	20
3.5 Perancangan Sistem.....	20
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	28
4.1 Hasil Pembuatan Model.....	28
4.2 Hasil Percobaan Penentuan Parameter dan Hyperparameter.....	30
4.3 Hasil Uji Kinerja Model.....	32
4.4 Pendekatan <i>Time Series</i>	32
4.5 Pendekatan Klasterisasi.....	41
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	55
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA.....	57
LAMPIRAN.....	62
Lampiran 1 Contoh Dataset.....	62
Lampiran 2 Source Code Penelitian.....	63
Lampiran 3 Visualisasi Output Pelatihan.....	82
Lampiran 4 Visualisasi <i>Output</i> Hasil Prakiraan.....	88

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Sesar Mendatar (<i>Strike-Slip Fault</i>) Sumber : (Faradiba, 2022).....	8
Gambar 2 Sesar Naik (<i>Thrust/Reverse Fault</i>) Sumber : (Faradiba, 2022).....	8
Gambar 3 Sesar Turun (<i>Normal Fault</i>) Sumber : (Faradiba, 2022).....	8
Gambar 4 Arsitektur <i>Long-Short Term Memory</i> Sumber : (Chevalier, 2018).....	11
Gambar 5 <i>Memory cell</i> Sumber : (Chevalier, 2018).....	12
Gambar 6 Gerbang lupa (<i>forget gate</i>) Sumber : (Chevalier, 2018).....	13
Gambar 7 Gerbang masukan (<i>input gate</i>) Sumber : (Chevalier, 2018).....	13
Gambar 8 Gerbang keluaran (<i>output gate</i>) Sumber : (Chevalier, 2018).....	14
Gambar 9 Peta Area Studi Kasus (Praptosuwiryo, 2021).....	17
Gambar 10 Peta Sesar Aktif Pulau Sulawesi Sumber : (Sabaruddin, 2023).....	18
Gambar 11 Gempa Palu 28 September 2018 Sumber : (Hasan, 2019).....	19
Gambar 12 Blok Diagram Penelitian.....	20
Gambar 13 Data Inputan.....	21
Gambar 14 Data <i>Cleaning</i>	21
Gambar 15 Filtrasi Data.....	22
Gambar 16 Penghapusan Data Duplikat.....	22
Gambar 17 Pengelompokan Data <i>Depth</i>	24
Gambar 18 Data Sebelum Normalisasi.....	25
Gambar 19 Data Setelah Normalisasi.....	25
Gambar 20 Arsitektur Model <i>LSTM</i>	30
Gambar 21 Kurva Training <i>Loss</i> Pendekatan <i>Time Series</i>	34
Gambar 22 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi <i>Latitude</i>	34
Gambar 23 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi <i>Longitude</i>	35
Gambar 24 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi <i>Depth</i>	35
Gambar 25 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi <i>Mag</i>	35
Gambar 26 Ploting Titik Gempa Data Aktual.....	36
Gambar 27 Ploting Titik Gempa Data Prediksi.....	36
Gambar 28 Keterangan Pada Titik Gempa.....	37
Gambar 29 Grafik Hasil Prakiraan <i>Latitude</i>	39
Gambar 30 Grafik Hasil Prakiraan <i>Longitude</i>	39
Gambar 31 Grafik Hasil Prakiraan <i>Depth</i>	39
Gambar 32 Grafik Hasil Prakiraan <i>Mag</i>	39
Gambar 33 Plotting Titik Gempa Hasil <i>Blind Prediction</i>	40
Gambar 34 Keterangan Pada Titik Gempa.....	40
Gambar 35 Kurva Training <i>Loss</i> Pendekatan Klasterisasi.....	42
Gambar 36 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi <i>Latitude Region 0</i>	43
Gambar 37 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi <i>Longitude Region 0</i>	43
Gambar 38 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi <i>Depth Region 0</i>	44
Gambar 39 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi <i>Mag Region 0</i>	44
Gambar 40 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi <i>Latitude Region 1</i>	44
Gambar 41 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi <i>Longitude Region 1</i>	45
Gambar 42 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi <i>Depth Region 1</i>	45
Gambar 43 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi <i>Mag Region 1</i>	45
Gambar 44 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi <i>Latitude Region 2</i>	46
Gambar 45 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi <i>Longitude Region 2</i>	46

Gambar 46 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi Depth Region 2	46
Gambar 47 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi Mag Region 2.....	47
Gambar 48 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi Latitude Region 3.....	47
Gambar 49 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi Longitude Region 3.....	47
Gambar 50 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi Depth Region 3	48
Gambar 51 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi Mag Region 3.....	48
Gambar 52 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi Latitude Region 4.....	48
Gambar 53 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi Longitude Region 4.....	49
Gambar 54 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi Depth Region 4	49
Gambar 55 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi Mag Region 4.....	49
Gambar 56 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi Latitude Region 5.....	50
Gambar 57 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi Longitude Region 5.....	50
Gambar 58 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi Depth Region 5	50
Gambar 59 Perbandingan Data Aktual Dan Prediksi Mag Region 5.....	51
Gambar 60 Ploting Titik Gempa Data Aktual	52
Gambar 61 Ploting Titik Gempa Data Prediksi	52
Gambar 62 Keterangan Pada Titik Gempa	53
Gambar 63 Grafik Hasil Prakiraan Latitude Tiap Region	54
Gambar 64 Grafik Hasil Prakiraan Longitude Tiap Region	54
Gambar 65 Grafik Hasil Prakiraan Depth Tiap Region	54
Gambar 66 Grafik Hasil Prakiraan <i>Mag</i> Tiap Region	54

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Skala Kekuatan Gempa Bumi dalam Magnitudo(Earthquake Magnitude Scale, 2023)	9
Tabel 2 Kategori Nilai <i>RMSE</i> (Davtalab, 2023)	16
Tabel 3 Hasil Evaluasi Matriks Pendekatan <i>Time Series</i>	32
Tabel 4 Keterangan Pada Titik Gempa	37
Tabel 5 Hasil Prakiraan	38
Tabel 6 Hasil Evaluasi Matriks Pendekatan Klasterisasi	41
Tabel 7 Evaluasi Matriks Keseluruhan	41
Tabel 8 Keterangan Pada Titik Gempa	53

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
LS	Lintang Selatan
LU	Lintang Utara
BT	Bujur Timur
Km	Kilometer
C_{t-1}	<i>Cell state</i> pada langkah waktu sebelumnya $t - 1$
h_{t-1}	<i>Hidden state</i> pada langkah waktu sebelumnya $t - 1$
X_t	Data inputan pada langkah waktu saat ini (t)
σ	Fungsi sigmoid
\tanh	Fungsi tangen hiperbolik
C_t	<i>Cell state</i> pada langkah waktu saat ini (t)
h_t	<i>Hidden state</i> pada langkah waktu saat ini (t)
f_t	<i>Forget gate</i>
W_f	Bobot dari <i>forget gate</i>
i_t	<i>Input gate</i>
W_i	Bobot dari <i>input gate</i>
\tilde{C}	<i>Intermediate cell state</i>
\tilde{C}_t	Nilai baru yang di tambahkan ke <i>cell state</i> (t)
W_c	Bobot dari <i>cell state</i>
o_t	<i>Output gate</i>
W_o	Bobot dari <i>output gate</i>
MSE	<i>Mean Square Error</i>
$RMSE$	<i>Root Mean Square Error</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
Σ	Sigma
\hat{Y}	Nilai prediksi
Y	Nilai aktual
n	Jumlah data

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Contoh Dataset	62
Lampiran 2 Source Code Penelitian.....	63
Lampiran 3 Visualisasi Output Pelatihan.....	82
Lampiran 4 Visualisasi <i>Output</i> Hasil Prakiraan.....	88

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin, dengan segala kerendahan hati, segala syukur penulis haturkan kepada Allah SWT atas nikmat dan karunia-Nya kepada kita semua. Semoga usaha untuk menciptakan hidup yang lebih baik senantiasa mendapatkan kelapangan jalan dari-Nya. Salawat dan salam senantiasa penulis haturkan kepada baginda Rasulullah SAW, pemimpin besar umat manusia yang mengantarkan manusia mengenali nilai-nilai kemanusiaan itu sendiri dan mengajarkan keutamaan ilmu. Sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini yang berjudul "Prakiraan Kemungkinan Terjadinya Gempa Bumi Menggunakan Metode Time Series Forecasting di Pulau Sulawesi dan Sekitarnya". Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan untuk menyelesaikan gelar Sarjana di Departemen Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Penulis mengucapkan terima kasih untuk seluruh pihak yang telah banyak membantu dan memberi dukungan hingga penulis dapat sampai pada proses penyelesaian skripsi ini. Ucapan terima kasih yang tidak terhingga penulis kepada kedua orang tua, Bapak **Rusdi, S.T** dan ibu **Hj. Muliati, S.Ag** sebagai motivator utama atas do'a, dukungan, kasih sayang, bimbingan dan kerja keras serta segala hal hingga penulis sampai pada titik sekarang ini, yang sampai kapanpun penulis tidak bisa membalas semuanya.

Penulis juga menyadari dalam proses penyelesaian skripsi ini tidaklah mudah, maka dari itu tidak menutup kemungkinan dalam penyusunan skripsi terdapat banyak kekurangan, baik dari segi bahasa maupun dalam penulisan, sehingga penulis sangat mengharapkan masukan, saran, dan kritikan yang bersifat membangun guna kesempurnaan skripsi ini.

Tentu banyak pihak-pihak lain yang telah membantu dengan penuh ketulusan dan keikhlasan hati dalam memberikan arah-arahan yang positif. Untuk itu, pada kesempatan ini Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak **Dr. Eng. Zulkifli Tahir, S.T., M.Sc.** selaku pembimbing I dan **Ir. Tyanita Puti Marindah Wardhani, S.T., M.Inf.** selaku pembimbing II,

yang telah memberikan dedikasi luar biasa dalam memberikan waktu, tenaga, pemikiran, dan perhatian yang sangat berarti untuk membimbing penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

2. **Ibu Ir. Anugrayani Bustamin, S.T., M.T.** selaku dosen-dosen non-pembimbing yang selalu memberikan dorongan kepada penulis untuk tetap fokus dalam penelitian dan selalu bersedia untuk menerima konsultasi penulis tanpa ragu.
3. Saudara dan saudari penulis; **Andri Pratama** dan **Nurhikmah Pratiwi, A.md** yang turut serta mendukung dan memberi semangat untuk menyelesaikan tugas akhir.
4. **Nurhayati, S.Si** selaku istri yang telah kebersamai, memberikan dukungan dan selalu memotivasi sampai penulis bisa menyelesaikan skripsi ini.
5. Kak **Muh. Fadhil Bin Bahrunnida, S.T** selaku kakak tingkat yang telah banyak membantu, selaku teman diskusi dan saling bertukar pikiran dalam menyelesaikan berbagai tantangan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Bapak dan ibu **Dosen di Departemen Teknik Informatika** Fakultas Teknik Informatika Universitas Hasanuddin atas didikannya selama masa perkuliahan.
7. Segenap **Staf Departemen Teknik Informatika** Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah banyak membantu administrasi semasa perkuliahan dan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
8. Keluarga besar **AIMP Research Group Unhas**, yang selalu menjadi teman diskusi dan saling bertukar pikiran mengenai berbagai tantangan dalam tugas akhir ini.
9. Keluarga Besar **SINCRONOUS18** yang telah kebersamai penulis hingga terselesaikannya tugas akhir ini.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gempa bumi merupakan suatu getaran atau guncangan yang terjadi di permukaan bumi akibat adanya pelepasan energi secara tiba-tiba di dalam lapisan kerak bumi. Getaran ini menyebar ke berbagai arah namun tidak bersifat permanen (Mulyo, 2018). Indonesia merupakan negara yang seringkali dilanda gempa bumi. Hal ini dikarenakan posisi Indonesia yang terletak pada zona subduksi empat lempeng tektonik yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Samudra Pasifik dan lempeng Eurasia serta satu lempeng mikro yaitu lempeng mikro Filipina (Ashar dkk., 2017). Data gempa bumi di Indonesia menunjukkan bahwa setiap tahun terjadi ratusan gempa bumi dengan berbagai magnitudo dan kedalaman. Pada tahun 2022 saja, Indonesia telah mengalami 10.792 kejadian gempa bumi dengan magnitudo yang signifikan mulai dari gempa dengan magnitudo dibawah 5 sebanyak 10.587 dan gempa dengan magnitudo diatas 5 sebanyak 205 kejadian gempa bumi (Daryono, 2022). Adapun kejadian gempa bumi yang terjadi di Pulau Sulawesi dengan magnitudo yang cukup tinggi adalah gempa di Palu Sulawesi Tengah pada tahun 2018, serta Majene dan Mamuju Sulawesi Barat pada tahun 2021 (Kusmiran dkk., 2022).

Wilayah utara pulau Sulawesi adalah salah satu area di Indonesia yang memiliki tingkat aktivitas gempa bumi yang sangat tinggi dibandingkan dengan wilayah lain di pulau Sulawesi. Hal ini disebabkan oleh posisi geografis wilayah utara pulau Sulawesi yang dipengaruhi oleh aktivitas lempeng laut Sulawesi di sebelah utara semenanjung Minahasa dan lempeng Samudra Pasifik di sebelah timur (Maramis dkk., 2020). Selain itu pada pulau Sulawesi terdapat beberapa patahan aktif seperti patahan Gorontalo, patahan Matano dan patahan Palu-Koro. Elemen-elemen tektonik inilah yang berperan sebagai sumber gempa bumi tektonik yang mempengaruhi tingkat kerawanan wilayah ini terhadap bahaya gempa bumi (Khairi dkk., 2020).

Prakiraan kemungkinan terjadinya gempa bumi di masa depan menjadi sangat penting untuk mengurangi dampak buruk yang ditimbulkan oleh bencana alam ini.

Oleh karena itu, diperlukan metode yang dapat digunakan untuk memprakirakan kemungkinan terjadinya gempa bumi di masa depan, sehingga dapat dilakukan tindakan pencegahan (Irawan dkk., 2020). Salah satu metode yang dapat digunakan untuk melakukan prakiraan adalah *Time Series Forecasting* (Manulang dkk., 2020). Metode *time series forecasting* adalah salah satu metode statistik yang digunakan untuk memprakirakan nilai variabel pada masa depan berdasarkan pola-pola yang terdapat pada data historis (Manulang dkk., 2020). Dengan memanfaatkan teknologi *Machine Learning*, *Time Series Forecasting* khususnya *Long Short Term Memory (LSTM)* dapat dijadikan metode untuk melakukan prakiraan pada data *time series* (Wiranda & Sadikin, 2019).

LSTM merupakan varian dari *RNN* yang memiliki kemampuan untuk menyimpan informasi dari pola-pola dalam data. *LSTM* memiliki keunggulan dibandingkan dengan *RNN* konvensional. *LSTM* dapat digunakan untuk memproses data *time series* dan memiliki kemampuan untuk mengingat informasi penting dari masa lalu dan mengabaikan informasi yang tidak relevan, sehingga dapat melakukan prakiraan pada data yang memiliki waktu yang lama (Firdaus, 2022). *LSTM* juga Dapat mengenali pola-pola dalam data yang kompleks, seperti pola yang berulang atau pola yang terjadi secara acak, sehingga dapat memberikan hasil yang lebih akurat dalam memprediksi data serta dapat dilatih menggunakan data historis, sehingga semakin banyak data yang digunakan untuk melatih model, semakin akurat hasil prediksinya (Qori dkk., 2022).

Prakiraan kemungkinan terjadinya gempa bumi menggunakan *LSTM* dapat memiliki peran penting dalam membantu mengurangi dampak kerusakan dan korban jiwa akibat gempa bumi. Seperti mengevakuasi daerah-daerah yang berpotensi terkena dampak gempa bumi atau memperkuat bangunan dan infrastruktur. Penelitian ini juga akan memberikan kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan serta teknologi di Indonesia, khususnya dalam bidang geofisika maupun pengembangan teknologi yang lebih efektif dan akurat dalam mengolah data yang bersifat kompleks.

Berdasarkan uraian di atas, maka inilah yang melatarbelakangi penulis untuk melakukan penelitian tentang “Prakiraan Kemungkinan Terjadinya Gempa Bumi Menggunakan Metode *Time Series Forecasting* di Pulau Sulawesi dan Sekitarnya”

yang bertujuan untuk merancang dan membangun serta menguji kinerja model *Long Short Term Memory (LSTM)* untuk memprakirakan kemungkinan terjadinya gempa bumi di pulau Sulawesi dan sekitarnya.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara membangun model *Long Short Term Memory (LSTM)* untuk memprakirakan kemungkinan terjadinya gempa bumi di Pulau Sulawesi dan sekitarnya?
2. Bagaimana hasil analisis dari model *Long Short Term Memory (LSTM)* dalam memprakirakan kemungkinan terjadinya gempa bumi di Pulau Sulawesi dan sekitarnya?

1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk merancang dan membangun model *Long Short Term Memory (LSTM)* dalam memprakirakan kemungkinan terjadinya gempa bumi di Pulau Sulawesi dan sekitarnya.
2. Untuk menganalisis hasil dari model *Long Short Term Memory (LSTM)* dalam memprakirakan kemungkinan terjadinya gempa bumi di Pulau Sulawesi dan sekitarnya.

1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Meningkatkan pemahaman tentang *Long Short Term Memory (LSTM)* serta penggunaannya dalam memprakirakan kemungkinan terjadinya gempa bumi.
2. Menghasilkan model prakiraan yang dapat membantu pihak berwenang untuk mengambil tindakan mitigasi bencana.
3. Memberikan informasi yang lebih akurat secara spasial dan berpotensi menyelamatkan nyawa manusia dan harta benda yang dapat terancam akibat gempa bumi.

1.5 Ruang Lingkup/Asumsi perancangan

Ruang lingkup dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini menggunakan metode *Time Series Forecasting* dengan algoritma *Long Short Term Memory (LSTM)*.
2. Penelitian ini menggunakan data historis gempa bumi di pulau Sulawesi dan sekitarnya dengan *range* waktu 15 tahun.
3. Area penelitian ini terletak di pulau Sulawesi dan sekitarnya dalam bentuk persegi panjang, yang terletak antara 6.5° LS (Lintang Selatan) hingga 2° LU (Lintang Utara), dan 118.5° BT (Bujur Timur) hingga 126° BT (Bujur Timur).
4. Sumber data yang digunakan berasal dari Badan Meterologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) dan *United State Geological Survey (USGS)*.
5. Penelitian ini menggunakan data dengan variabel berupa, lokasi (*latitude* dan *longitude*), kekuatan (*mag*) dan kedalaman hiposentrum gempa bumi (*depth*).
6. Hasil dari penelitian ini adalah informasi berupa peta spasial dengan informasi lokasi gempa (*latitude* dan *longitude*), kedalaman (*depth*) dan kekuatan gempa bumi (*mag*).

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Gempa Bumi

2.1.1 Pengertian Gempa Bumi

Gempa bumi merupakan suatu getaran atau guncangan yang terjadi di permukaan bumi akibat adanya pelepasan energi secara tiba-tiba di dalam lapisan kerak bumi. Getaran ini menyebar ke berbagai arah namun tidak bersifat permanen (Mulyo, 2018). Jumlah kejadian gempa bumi merusak pada tahun 2021 mencapai puncak tertinggi dalam dua dekade terakhir, tercatat sebanyak 26 kali. Rentetan kejadian gempa bumi merusak tahun 2021 dimulai dengan gempa bumi yang terjadi di Morowali, Provinsi Sulawesi Tengah pada tanggal 4 Januari 2021, dan berakhir dengan kejadian gempa bumi di Maluku Barat Daya, Provinsi Maluku pada tanggal 30 Desember 2021 (Shalih dkk., 2023)

2.1.2 Jenis-Jenis Gempa Bumi

Menurut BPBD Kota Banda Aceh (2018), Gempa bumi dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan penyebab dan kedalamannya, yaitu;

1. Berdasarkan Penyebabnya

- a. Gempa Vulkanik

Gempa bumi vulkanik merupakan fenomena geologi yang terjadi akibat dari aktivitas letusan gunung berapi. Letusan gunung berapi dapat menghasilkan suatu getaran atau guncangan pada permukaan bumi yang disebut gempa bumi vulkanik.

- b. Gempa Tektonik

Gempa bumi tektonik merupakan jenis gempa bumi yang terjadi akibat pergeseran atau gesekan antara lempeng-lempeng tektonik di lapisan kulit bumi. Gempa ini terjadi ketika pelepasan energi yang dihasilkan dari tekanan yang terakumulasi selama periode waktu tertentu. Gempa tektonik sering kali memiliki kekuatan yang signifikan dan dapat menimbulkan kerusakan yang dahsyat pada wilayah yang terkena dampaknya.

c. Gempa Runtuhan Atau Terban

Gempa runtuhan atau terban adalah jenis gempa bumi yang disebabkan oleh runtuhnya tanah atau material di dalam tanah, seperti longsoran tanah, gua-gua yang runtuh, atau pergeseran massa batuan. Gempa ini umumnya memiliki dampak yang relatif kecil dan wilayahnya terbatas.

2. Berdasarkan Kedalamannya

Menurut Cui dkk. (2022) mengenai kedalaman gempa, dapat diuraikan sebagai berikut:

a. Gempa Bumi Dangkal

Gempa bumi dangkal adalah jenis gempa bumi yang memiliki *hiposentrum* (pusat gempa) berada pada kedalaman kurang dari 60 km dari permukaan bumi. Gempa bumi dangkal cenderung menimbulkan kerusakan yang besar dan dampak yang signifikan. Kekuatan gempa bumi dangkal bisa sangat berbahaya karena getarannya langsung terasa di permukaan bumi dan dapat menyebabkan kerusakan struktural yang signifikan pada bangunan dan infrastruktur. Gempa bumi dangkal juga seringkali diikuti oleh guncangan susulan atau *aftershock*, yang dapat meningkatkan risiko kerusakan lebih lanjut.

b. Gempa Bumi Menengah

Gempa bumi menengah adalah jenis gempa bumi yang memiliki *hiposentrum* (pusat gempa) berada dalam kisaran kedalaman antara 60 km hingga 300 km di bawah permukaan bumi. Gempa bumi menengah umumnya menimbulkan kerusakan yang ringan dan getarannya lebih terasa dibandingkan dengan gempa bumi dalam.

c. Gempa Bumi Dalam

Gempa bumi dalam adalah jenis gempa bumi yang memiliki *hiposentrum* (pusat gempa) berada pada kedalaman lebih dari 300 km di dalam kerak bumi. Gempa bumi dalam umumnya memiliki dampak yang relatif tidak berbahaya.

2.1.3 Penyebab Gempa Bumi

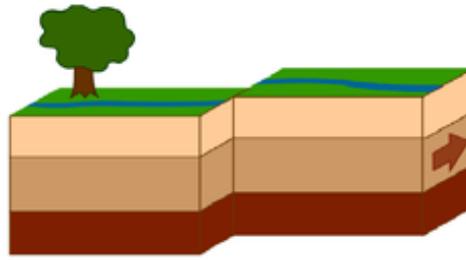
Gempa bumi dapat terjadi akibat berbagai peristiwa seperti letusan gunung api, benturan meteorit, tanah longsor, ledakan bom, dan penyebab lainnya. Namun, secara umum, gempa bumi yang paling sering terjadi khususnya di Indonesia adalah gempa bumi tektonik yang disebabkan karena adanya pergeseran pada lapisan lempeng tektonik (Ishomyl F.A dkk., 2020). Menurut teori lempeng tektonik, kerak bumi terbagi menjadi beberapa lempeng yang saling terpisah. Lempeng-lempeng ini bergerak dengan arah dan kecepatan yang berbeda. Gerakan lempeng dapat berupa konvergensi (bergerak mendekat), divergensi (bergerak menjauh), atau transformasi (bergerak sejajar namun saling tergeser). Gerakan lempeng tektonik ini terjadi di sepanjang batas-batas lempeng dan dapat menyebabkan terbentuknya patahan, yang pada waktu tertentu dapat menjadi sumber gempa bumi. (Amanda dkk., 2022).

Secara geologi, patahan adalah retakan atau rekahan dalam kerak bumi yang disertai dengan pergeseran relatif antara dua blok batuan yang berdekatan. Patahan terbentuk akibat adanya tekanan dan tegangan yang mengakumulasi di dalam kerak bumi, melebihi batas kekuatan material. Pada patahan, terjadi pergeseran *horizontal*, *vertikal*, atau kombinasi dari keduanya antara blok-blok batuan yang bersebelahan (Naufal, 2022).

Menurut Noor (2012) Sesar atau patahan adalah formasi geologi yang terdiri dari rekahan atau retakan pada batuan yang telah mengalami pergeseran relatif antara bagian-bagian yang berhadapan. Sesar sering kali ditemukan bersama dengan struktur geologi lainnya seperti lipatan, rekahan, dan sebagainya. Berdasarkan pada sifat gerakannya, sesar dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis yaitu;

1. Sesar Mendatar (*Strike-Slip Fault*)

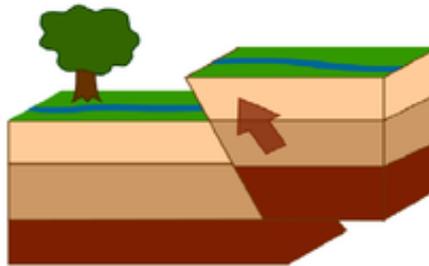
Jenis sesar ini terjadi ketika gerakan relatif antara bagian *hanging wall* dan *foot wall* terjadi secara *horizontal* atau sejajar dengan bidang patahan. Gerakan ini dapat berupa pergeseran *horizontal* ke kanan atau ke kiri.



Gambar 1 Sesar Mendatar (*Strike-Slip Fault*)
Sumber : (Faradiba, 2022)

2. Sesar Naik (*Thrust/Reverse Fault*)

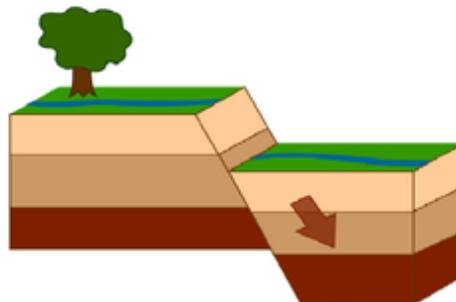
Sesar ini terjadi ketika bagian *hanging wall* bergerak relatif naik terhadap bagian *foot wall*. Gerakan ini menghasilkan perlipatan dan penumpukan lapisan batuan, yang biasanya terjadi di daerah dengan deformasi kerak yang kompleks.



Gambar 2 Sesar Naik (*Thrust/Reverse Fault*)
Sumber : (Faradiba, 2022)

3. Sesar Turun (*Normal Fault*)

Jenis sesar ini terjadi ketika bagian *hanging wall* bergerak relatif turun terhadap bagian *foot wall*. Biasanya terjadi di daerah dengan perpanjangan kerak bumi atau peregangan tektonik, dan dapat menyebabkan pembentukan lembah atau gaben.



Gambar 3 Sesar Turun (*Normal Fault*)
Sumber : (Faradiba, 2022)

2.1.4 Dampak Gempa Bumi

Gempa bumi memiliki potensi untuk menyebabkan kerusakan pada bangunan dan infrastruktur. Guncangan yang dihasilkan oleh gempa dapat merusak struktur bangunan, jembatan, jalan, dan fasilitas lainnya. Kerusakan struktural dapat bervariasi mulai dari retak-retak kecil hingga keruntuhan total, tergantung pada kekuatan dan jarak gempa dari lokasi (Husein, 2016).

Gempa bumi sering kali menyebabkan korban jiwa dan luka-luka. Guncangan yang kuat dan keruntuhan bangunan dapat mengakibatkan cedera serius dan bahkan kematian bagi mereka yang terkena dampaknya. Selain itu, gempa bumi juga dapat menyebabkan longsor, runtunan, dan kejadian bencana lainnya yang berpotensi membahayakan keselamatan manusia (Shalih dkk., 2023).

Dampak ekonomi akibat gempa bumi dapat sangat signifikan. Kerusakan pada infrastruktur, bangunan, dan fasilitas produktif dapat menyebabkan kerugian finansial yang besar. Selain itu, gempa bumi juga dapat mengganggu sektor industri dan perdagangan, menghambat aktivitas ekonomi, serta mempengaruhi ketahanan ekonomi suatu daerah atau negara (Widayati dkk., 2023).

Dalam upaya memahami gempa bumi dan implikasinya, salah satu aspek esensial yang perlu ditekankan adalah skala kekuatan gempa. Skala ini, yang diukur dalam bentuk magnitudo, memberikan gambaran mengenai jumlah energi yang dilepaskan oleh gempa. Memahami skala magnitudo memungkinkan kita untuk menilai potensi dampak dan kerusakan yang mungkin timbul akibat gempa. Berdasarkan (Earthquake Magnitude Scale, 2023), berikut ini adalah Tabel 1 yang memuat rentang skala kekuatan gempa dalam magnitudo beserta ringkasan akibat yang bisa terjadi:

Tabel 1 Skala Kekuatan Gempa Bumi dalam Magnitudo (Earthquake Magnitude Scale, 2023)

Magnitudo	Dampak	Perkiraan Jumlah Tiap Tahun
2,5 atau kurang	Biasanya tidak terasa, namun dapat terekam oleh seismograf.	Jutaan
2,5 – 5,4	Sering terasa, namun menimbulkan kerusakan ringan.	hanya 500,000

Magnitudo	Dampak	Perkiraan Jumlah Tiap Tahun
5,5 – 6,0	Kerusakan ringan pada bangunan dan struktur lainnya.	350
6,1 – 6,9	Dapat menyebabkan banyak kerusakan di daerah berpenduduk padat.	100
7,0 – 7,9	Gempa bumi besar. Kerusakan serius.	10-15
8,0 atau lebih tinggi	Gempa bumi yang hebat. Dapat menghancurkan komunitas di sekitar pusat gempa secara total.	1 tiap 1 atau 2 tahun

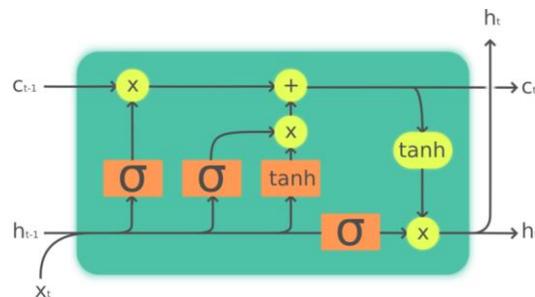
2.2 Time Series Forecasting

Time series forecasting adalah metode analisis data yang digunakan untuk meramalkan nilai-nilai masa depan dalam suatu rangkaian data yang teratur berdasarkan waktu. Metode ini memanfaatkan pola dan tren yang terdapat dalam data historis untuk membuat prediksi tentang nilai-nilai di masa mendatang (Ridla dkk., 2023). *Time series forecasting* dapat digunakan dalam berbagai bidang, termasuk ekonomi, keuangan, meteorologi, peramalan penjualan, dan banyak lagi. Salah satu metode yang bisa melakukan komputasi dengan baik pada data-data berbentuk *time series* dan memiliki performa yang baik adalah *Long Short Term Memory (LSTM)* (Sofi dkk., 2021).

2.2.1 Long Short-Term Memory (LSTM)

Long Short-Term Memory (LSTM) adalah sebuah varian dari Jaringan Saraf Rekuren (*Recurrent Neural Network/RNN*). *LSTM* dikembangkan dengan tujuan untuk mengatasi masalah hilangnya gradien (*vanishing gradient*) yang sering terjadi pada *RNN*. Dalam *LSTM*, sebuah *memory cell* ditambahkan untuk mampu menyimpan informasi dalam jangka waktu yang lebih panjang. Hal ini memungkinkan *LSTM* untuk mengingat dan mempertahankan informasi yang relevan dari *input* sebelumnya. Salah satu keunggulan *LSTM* adalah kemampuannya dalam memilih informasi yang paling relevan dan signifikan melalui blok memori (*memory block*) yang ada di dalamnya. Dengan demikian,

LSTM menjadi efektif dalam pemodelan data yang memiliki ketergantungan jangka panjang dan kompleksitas yang tinggi (Khumaidi & Nirmala, 2022).



Gambar 4 Arsitektur *Long-Short Term Memory*
Sumber : (Chevalier, 2018)

dimana,

C_{t-1} = *Cell state* pada langkah waktu sebelumnya $t - 1$

h_{t-1} = *Hidden state* pada langkah waktu sebelumnya $t - 1$

X_t = Data inputan pada langkah waktu saat ini (t)

σ = Fungsi sigmoid

\tanh = Fungsi tangen hiperbolik

\times = Operasi perkalian

$+$ = Operasi penjumlahan

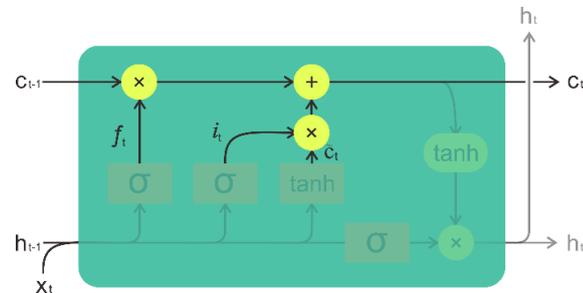
C_t = *Cell state* pada langkah waktu saat ini (t)

h_t = *Hidden state* pada langkah waktu saat ini (t)

Arsitektur *LSTM* terdiri dari beberapa lapisan utama, yaitu lapisan *input*, lapisan *output*, dan lapisan tersembunyi. Lapisan tersembunyi merupakan inti dari *LSTM* dan terdiri dari satu atau lebih *memory cell*. Setiap sel memori dapat menyimpan informasi dalam jangka waktu panjang atau singkat, sambil mengendalikan aliran informasi dengan presisi (Wiranda & Sadikin, 2019).

Pada arsitektur *LSTM*, penggunaan fungsi sigmoid memiliki peran penting dalam mengatur aliran informasi di dalam sel-sel memori. Fungsi sigmoid digunakan untuk mengonversi nilai-nilai antara -1 dan 1 menjadi rentang nilai antara 0 dan 1. Dengan demikian, fungsi sigmoid membantu dalam mengontrol bagaimana informasi disimpan dan diperbarui dalam sel memori dari langkah waktu sebelumnya ke langkah waktu saat ini. Selain itu, fungsi \tanh juga digunakan dalam arsitektur *LSTM* untuk mengatur nilai-nilai yang melewati jaringan agar tetap

berada dalam rentang antara -1 dan 1. Kombinasi kedua fungsi aktivasi ini memungkinkan *LSTM* untuk memproses dan menyimpan informasi secara efektif, mempertahankan kestabilan dalam aliran informasi di dalam sel-sel memori, dan menghasilkan prediksi yang akurat (Wati & Pramarta, 2022).

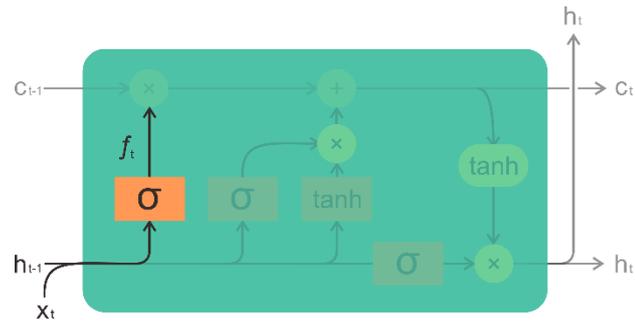


Gambar 5 *Memory cell*
Sumber : (Chevalier, 2018)

Memory cell memiliki tiga jenis gerbang yang memainkan peran penting dalam pengaturan aliran informasi di dalam sel tersebut. Gerbang masukan (*input gate*) mengontrol seberapa banyak informasi baru yang akan dimasukkan ke dalam *memory cell*. Gerbang lupa (*forget gate*) mengatur sejauh mana informasi lama akan dipertahankan atau dilupakan dalam *memory cell*. Sedangkan gerbang keluaran (*output gate*) mengatur berapa banyak informasi dari *memory cell* yang akan dikeluarkan sebagai *output* dari *LSTM* (Tang dkk., 2021).

Setiap gerbang yang terdapat dalam arsitektur *LSTM* memiliki fungsi dan peran yang spesifik, seperti yang dijelaskan oleh (Wiranda & Sadikin, 2019) berikut;

1. Gerbang lupa (*forget gate*), berfungsi untuk mengatur sejauh mana informasi lama akan dipertahankan atau dilupakan dalam *memory cell*. Gerbang ini memungkinkan *LSTM* untuk melupakan informasi yang tidak lagi relevan atau tidak diperlukan untuk prediksi yang lebih akurat. *Forget gate* adalah lapisan yang menggunakan sigmoid untuk menggabungkan *output* dari waktu $t - 1$ dan input pada waktu t , kemudian menerapkan fungsi aktivasi *sigmoid*. Hasil keluaran dari *gate* ini selalu berada di antara 0 dan 1. Jika nilai f_t adalah 0, maka informasi sebelumnya akan diabaikan, sementara jika nilai f_t adalah 1, informasi sebelumnya akan dipertahankan tanpa perubahan.



Gambar 6 Gerbang lupa (*forget gate*)
Sumber : (Chevalier, 2018)

Secara matematis, *forget gate* dapat ditulis seperti persamaan 1 berikut:

$$f_t = \sigma(W_f h_{t-1} + W_f X_t) \quad (1)$$

dimana,

W_f = Bobot dari *forget gate*

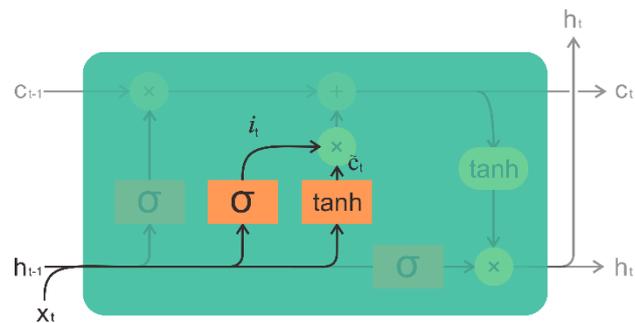
σ = Fungsi *sigmoid*

h_{t-1} = *Hidden state* pada langkah waktu sebelumnya $t - 1$

X_t = *Input* pada waktu saat ini (t)

f_t = *Forget gate*

2. Gerbang masukan (*input gate*), berfungsi untuk mengatur sejauh mana informasi baru dan *output* dari lapisan sebelumnya akan dimasukkan ke dalam *memory cell*. Gerbang ini bertanggung jawab dalam mengontrol aliran informasi baru yang akan disimpan dalam memori jangka panjang.



Gambar 7 Gerbang masukan (*input gate*)
Sumber : (Chevalier, 2018)

Secara matematis, *input gate* dapat ditulis seperti persamaan 2 berikut :

$$i_t = \sigma(W_i h_{t-1} + W_i X_t) \quad (2)$$

dimana,

W_i = Bobot dari *input gate*

h_{t-1} = State sebelumnya atau *state* pada waktu $t - 1$
 X_t = *Input* pada waktu saat ini (t)
 σ = Fungsi sigmoid

Nilai dari *input gate* dikalikan dengan *output* dari lapisan kandidat (\tilde{C}).

Rumus dari lapisan kandidat (\tilde{C}) adalah sebagai berikut :

$$\tilde{C} = \tanh(W_c h_{t-1} + W_c X_t) \quad (3)$$

$$C_t = (i_t * \tilde{C}_t + f_t * C_{t-1}) \quad (4)$$

dimana,

\tilde{C} = *Intermediate cell state*

\tilde{C}_t = Nilai baru yang ditambahkan ke *cell state* (t)

W_c = Bobot dari *cell state*

h_{t-1} = State sebelumnya atau *state* pada waktu $t - 1$

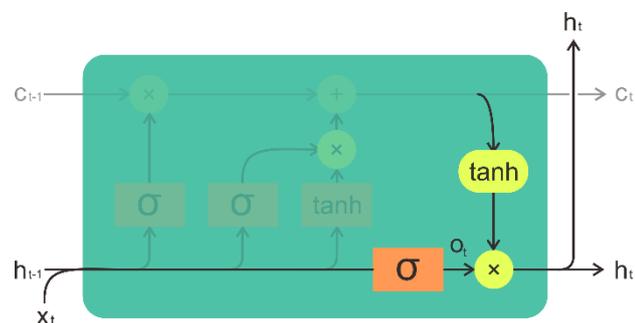
X_t = *Input* pada waktu saat ini (t)

\tanh = Fungsi tangen hiperbolik

i_t = *Input gate*

C_{t-1} = *Cell state* sebelumnya atau pada waktu $t - 1$

3. Gerbang keluaran (*output gate*), berfungsi untuk mengontrol berapa banyak informasi dari *memory cell* yang akan dikeluarkan sebagai *output* dari *LSTM*. Gerbang ini memungkinkan *LSTM* untuk memilih informasi yang paling relevan dan berguna dalam menghasilkan prediksi atau *output* yang akurat. Dan terakhir menghasilkan *cell state* yang baru h_t .



Gambar 8 Gerbang keluaran (*output gate*)

Sumber : (Chevalier, 2018)

Secara matematis, *output gate* dapat ditulis seperti persamaan 5 berikut :

$$o_t = \sigma(W_o h_{t-1} + W_o X_t) \quad (5)$$

$$h_t = o_t * \tanh (c_t) \quad (6)$$

dimana,

W_o = Bobot dari *output gate*

h_{t-1} = *State* sebelumnya atau *state* pada waktu $t - 1$

X_t = *Input* pada waktu saat ini (t)

σ = Fungsi *sigmoid*

\tanh = Fungsi tangen hiperbolik

2.3 K-Means

K-Means adalah metode *clustering* yang termasuk dalam kategori pendekatan *partitioning*. Algoritma ini menggunakan model *centroid*, di mana *centroid* berfungsi sebagai pusat dari setiap *cluster*. *Centroid* adalah titik representatif yang mewakili posisi rata-rata dari semua objek dalam sebuah *cluster*. Dalam proses *clustering*, jarak setiap objek data dihitung terhadap *centroid cluster*. Objek data akan dimasukkan ke dalam *cluster* yang memiliki jarak terdekat dengan *centroid*-nya. Dengan demikian, algoritma *K-Means* bertujuan untuk mengelompokkan data secara efisien dengan meminimalkan kesalahan pengelompokan, yaitu perbedaan antara data dan *centroid cluster* yang diwakilinya. *K-Means* merupakan algoritma pembelajaran yang relatif sederhana namun efektif dalam menyelesaikan masalah pengelompokan data (Hajar dkk., 2020).

2.4 Parameter Evaluasi

Parameter evaluasi adalah ukuran atau metrik yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja suatu model atau algoritma dalam pemrosesan data. Tujuan utama dari penggunaan parameter evaluasi adalah untuk mengukur sejauh mana model atau algoritma mampu melakukan tugas tertentu secara efektif dan akurat. Parameter evaluasi membantu dalam mengukur keberhasilan atau ketidakberhasilan suatu model dalam memprediksi atau mengklasifikasikan data dengan benar. Dalam mengevaluasi model pada proses pelatihan, penelitian ini menggunakan *Root Mean Squared Error (RMSE)*

2.4.1 Root Mean Absolute Error (RMSE)

Salah satu metode evaluasi umum yang sering digunakan selain *Mean Absolute Error (MAE)* adalah *Root Mean Squared Error (RMSE)*. Secara teknis, *RMSE* dapat dianggap sebagai operasi akar kuadrat terhadap hasil dari *MSE*. Meskipun secara teknis hanya melibatkan operasi akar kuadrat, namun dampaknya sangat signifikan. Hal ini terjadi karena *RMSE* mampu mengoreksi pengaruh angka berlipat ganda yang dihasilkan oleh *MSE*, sehingga memberikan representasi yang lebih normal dan mudah dipahami (Saputra & Kristiyanti, 2022). Rumus perhitungan *RMSE* adalah seperti persamaan 8 berikut:

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{(\hat{Y}-Y)^2}{N}} \quad (8)$$

dimana,

\hat{Y} = Nilai prediksi

Y = Nilai aktual

N = jumlah data

Berdasarkan rumus tersebut, nilai *RMSE* dari model yang telah dibangun dapat diperoleh. Adapun kategori nilai dari *RMSE* dapat di lihat pada Tabel 2 berikut ini:

Tabel 2 Kategori Nilai *RMSE* (Davtalab, 2023)

Nilai <i>RMSE</i>	Keterangan
$RMSE \leq 0.75$	Sangat Baik
$0.75 < RMSE \leq 1.0$	Baik
$1.0 < RMSE \leq 2.0$	Memuaskan
$RMSE > 2.0$	Tidak Memuaskan