

# **SKRIPSI**

## **PENERAPAN *LIGHT GRADIENT BOOSTING MACHINE* (LGBM) UNTUK PERHITUNGAN METRIK *EXPECTED GOALS* (xG) DALAM ANALISIS SEPAK BOLA**

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Komputer

Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta



Disusun oleh:

**Fadhil Raihan Akbar**  
**NIM. 11210930000101**

**PROGRAM STUDI SISTEM INFORMASI  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SYARIF HIDAYATULLAH JAKARTA  
2025 M/1447 H**

# **SKRIPSI**

## **PENERAPAN *LIGHT GRADIENT BOOSTING MACHINE* (LGBM) UNTUK PERHITUNGAN METRIK *EXPECTED GOALS* (xG) DALAM ANALISIS SEPAK BOLA**

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Komputer

Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta



Disusun oleh:

**Fadhil Raihan Akbar**

**NIM. 11210930000101**

**PROGRAM STUDI SISTEM INFORMASI  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SYARIF HIDAYATULLAH JAKARTA  
2025 M/1447 H**



## **LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**



## **LEMBAR PENGESAHAN UJIAN**

## **LEMBAR PERNYATAAN**





## **ABSTRAK**



## **DAFTAR ISI**

<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
-------------------------------	-------------------------------------



## **DAFTAR GAMBAR**



## **DAFTAR TABEL**

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

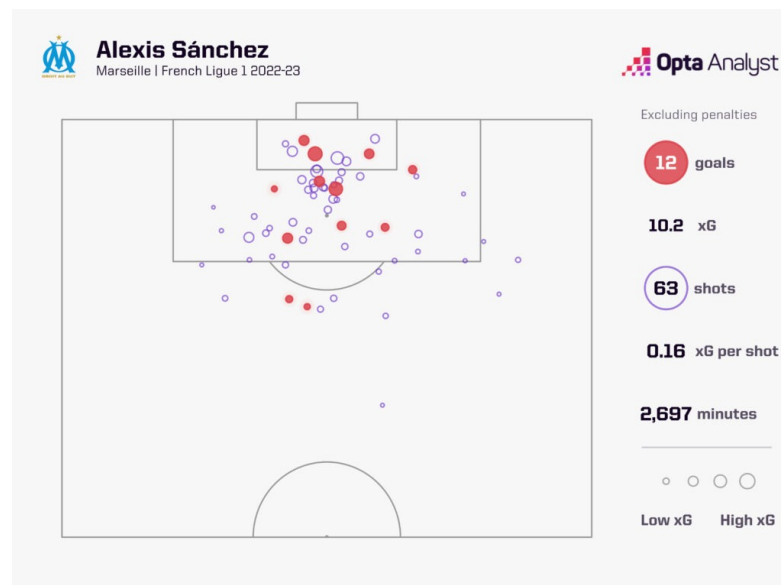
Sepak bola modern telah bertransformasi menjadi industri global di mana klub-klub beroperasi sebagai entitas bisnis yang mengandalkan sistem informasi dan analisis data untuk meraih keunggulan kompetitif. Dalam konteks ini, metrik prediktif seperti *Expected Goals* (xG) yang menggambarkan probabilitas suatu tembakan akan menghasilkan gol berdasarkan sejumlah variabel kontekstual telah menjadi komponen krusial dalam sistem pendukung keputusan. Menurut Eggels (2016), xG tidak hanya merepresentasikan kualitas peluang dengan cukup akurat, tetapi juga mampu memberikan wawasan penting terhadap hasil pertandingan secara keseluruhan. Agregasi nilai xG dari setiap pertandingan bahkan dapat digunakan untuk memperkirakan hasil yang seharusnya terjadi, menjadikannya alat evaluasi performa tim yang sangat berguna.

Kegunaan xG sebagai alat evaluasi yang andal menjadikannya lebih dari sekadar statistik pasca-pertandingan, metrik ini menjadi input fundamental bagi sistem pendukung keputusan (*Decision Support Systems*) yang terintegrasi di dalam klub. Sistem inilah yang memungkinkan pengambilan keputusan berbasis bukti diterapkan pada berbagai aspek strategis, mulai dari penyusunan taktik pertandingan, rekrutmen dan valuasi pemain, hingga pencegahan cedera (Chatziparaskevas *et al.*, 2024). Fenomena ini menandai pergeseran paradigma dalam pengelolaan bisnis sepak bola, di mana pendekatan ilmiah dan teknologi



prediktif digunakan untuk mengubah data mentah menjadi wawasan strategis (*strategic insights*) yang mendukung pencapaian tujuan kompetitif dan finansial klub. Oleh karena itu, upaya untuk terus mengembangkan model prediktif seperti xG agar semakin akurat dan efisien telah menjadi subjek berbagai penelitian, yang menandai evolusi dalam analisis sepak bola dengan berbagai pencapaian serta keterbatasan.

Dalam praktiknya, metrik xG dapat divisualisasikan melalui representasi spasial seperti *shot map* yang menggambarkan lokasi dan kualitas tembakan tiap pemain. Sebagai contoh, Gambar 1.1 memperlihatkan distribusi tembakan Alexis Sánchez dalam satu musim 2022-2023, lengkap dengan nilai xG dari masing-masing tembakan. Visualisasi ini sangat membantu pelatih dan analis dalam mengevaluasi efektivitas penyelesaian akhir dan pengambilan keputusan di area sepertiga akhir lapangan.



Gambar 1.1 Visualisasi *Shot-map* xG (Whitmore, 2023)

Perkembangan xG berdasarkan penelitian yang diteliti dapat dilihat pada

Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Perkembangan xG

<b>Tahun</b>	<b>Sumber</b>	<b>Judul &amp; Peneliti</b>	<b>Algoritma</b>	<b>Dataset</b>
1997	<i>The Statistician</i>	<i>Measuring the effectiveness of playing strategies at soccer</i> (Pollard & Reep)	<i>Logistic Regression</i>	22 match, 489 tembakan
2005	<i>World congress on science and football: Conference Paper</i>	<i>Applications of Logistic Regression to Shots at Goal in Association Football</i> (Ensum, Pollard, & Taylor)	<i>Logistic Regression</i>	48 match, 1.099 tembakan
2015	ESANN 2015 proceedings	<i>Measuring scoring efficiency through goal expectancy estimation</i> (Ruiz et al.)	<i>Multilayer Perceptron (MLP)</i>	EPL 2013/14, Prozone, 10.318 tembakan
2016	<i>Master's Thesis / MLSA 2016</i>	<i>Expected Goals in Soccer Explaining Match Results Using Predictive Analytics</i> (Eggels)	<i>Logistic Regression, Decision Tree, Random Forest, AdaBoost, Isotonic</i>	>1.000 peluang, 5.020 match (Data tembakan tidak disebutkan)
2022	<i>Journal of the Operational Research Society</i> 76(1)	<i>Explainable Expected Goals</i> (Cavus & Biecek)	<i>XGBoost, Random Forest, LightGBM, CatBoost via Forester AutoML</i>	Understat event data (315.430 tembakan dari 7 musim Top 5 Eropa)
2025	<i>Frontiers in Sports &amp; Active Living</i>	<i>Toward Interpretable Expected Goals Modeling Using Bayesian Mixed Models</i> (Iapteff et al., 2025)	<i>Bayesian Generalized Linear Mixed Model (GLMM) + Transfer Learning</i>	StatsBomb 2003–22: 460 match, 63.177 tembakan

Berdasarkan Tabel 1.1, terlihat evolusi signifikan dalam penelitian xG dari tahun 1997 hingga 2025, yang ditandai oleh dua tren utama yaitu peningkatan kompleksitas algoritma dan skala *dataset* yang digunakan. Pada awalnya, penelitian seperti oleh Pollard & Reep (1997) dan Ensum, Pollard, & Taylor (2005) bergantung pada model fundamental *Logistic Regression*. Metodologi kemudian berkembang dengan penerapan model jaringan saraf seperti *Multilayer Perceptron* (MLP) pada tahun 2015 dan eksplorasi beragam algoritma *machine learning* termasuk *Random Forest* dan AdaBoost pada tahun 2016. Puncak kecanggihan metode terlihat pada penelitian tahun 2025 oleh Iapteff *et al*, yang menerapkan model statistik canggih *Bayesian Generalized Linear Mixed Model* (GLMM) yang dikombinasikan dengan *Transfer Learning*. Perkembangan ini didukung oleh peningkatan skala data secara eksponensial, mulai dari 489 tembakan pada tahun 1997 meningkat menjadi 10.318 tembakan pada 2015 dan mencapai puncaknya pada 63.177 tembakan dalam penelitian terbaru.

Berdasarkan tinjauan terhadap berbagai pendekatan model prediksi xG sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa meskipun sejumlah algoritma seperti, *Logistic Regression*, GLMM, hingga *Random Forest* telah menunjukkan potensi dalam membangun model prediktif, masing-masing memiliki keterbatasan dalam hal efisiensi, skalabilitas, dan fleksibilitas dalam menangani kompleksitas spasial maupun temporal data sepak bola. Untuk menangkap kompleksitas spasial dan non-linear dari data pertandingan sepak bola, dibutuhkan algoritma yang tidak hanya akurat tetapi juga efisien secara komputasi. Dalam penelitian ini, *Light Gradient Boosting Machine* (LightGBM) menjadi algoritma yang sangat potensial karena

kemampuannya dalam menangani *dataset* besar, memproses fitur dalam jumlah banyak, serta membangun model prediktif non-linear dengan waktu pelatihan yang jauh lebih cepat dibandingkan metode *boosting* konvensional tanpa mengorbankan akurasi (Hartanto *et al.*, 2023).

LightGBM sangat relevan diterapkan dalam konteks data sepak bola yang bersifat spasial-temporal, kompleks, dan sering kali tidak linier (Artzi *et al.*, 2020). Selain itu, algoritma ini memiliki kelebihan dalam kemampuan interpretasi dan efisiensi waktu komputasi yang menjadikannya ideal untuk kebutuhan praktis seperti pembuatan model prediksi xG yang presisi dan dapat diterapkan secara *real-time*.

Perbandingan performa antara LightGBM dengan model lain seperti XGBoost juga menunjukkan hasil yang kompetitif. Dalam penelitian oleh Nemeth *et al.* (2019), LightGBM berhasil menurunkan tingkat kesalahan prediksi *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) menjadi 2,45%, sedangkan XGBoost hanya mencapai MAPE sebesar 4,33% pada pemodelan konsumsi energi di gedung yang sama. Perbedaan ini memperlihatkan bahwa LightGBM mampu menghasilkan prediksi yang lebih akurat pada data berstruktur kompleks dan berdimensi tinggi. Meskipun kedua metode sama-sama memberikan performa yang baik, selisih MAPE hampir dua kali lipat menunjukkan keunggulan LightGBM dalam mengurangi deviasi relatif antara nilai prediksi dan nilai aktual. Keunggulan ini disinyalir berasal dari efisiensi algoritma *gradient boosting* yang di optimalisasi, serta teknik pertumbuhan pohon *leaf-wise* yang lebih adaptif terhadap pola non-linear dalam data. Nemeth *et al.* (2019) juga menekankan bahwa, meski LightGBM

sudah unggul dalam eksperimen tersebut, optimasi lebih lanjut pada penentuan parameter model seperti pemilihan jumlah pohon, kedalaman maksimal, dan *learning rate* dapat meningkatkan akurasi prediksi LightGBM secara signifikan.

Lebih jauh, LightGBM dikenal sebagai *framework gradient boosting* berperforma tinggi yang berbasis algoritma *decision tree*. LightGBM termasuk dalam kategori *machine learning*, karena menggunakan pendekatan *ensemble decision tree* untuk membangun model prediktif. Sebagai implementasi dari *Gradient Boosting Decision Tree* (GBDT), algoritma ini menawarkan kecepatan pelatihan yang tinggi dan efisiensi dalam menangani *dataset* besar tanpa mengorbankan akurasi. Keunggulan ini telah dibuktikan dalam berbagai domain, bahkan di sektor kesehatan seperti diagnosis penyakit dan prediksi klinis, di mana kebutuhan akan klasifikasi cepat dan akurat sangat penting (Artzi *et al.*, 2020).

Pada pembangunan model xG, LightGBM menawarkan kemampuan untuk belajar dari data historis dengan efisiensi tinggi. Menurut Ke *et al.* (2017), LightGBM dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan GBDT dalam menangani *big data*, dengan waktu pelatihan yang hingga 20 kali lebih cepat namun tetap mempertahankan tingkat akurasi yang sebanding (Hartanto *et al.*, 2023). Selain itu, LightGBM menunjukkan efisiensi komputasi yang tinggi dan sensitivitas rendah terhadap *hyperparameter*, menjadikannya pilihan yang andal untuk berbagai aplikasi (Sheridan *et al.*, 2021).

Untuk mencapai efisiensi tersebut, LightGBM memperkenalkan dua inovasi utama yaitu, *Gradient-based One-Side Sampling* (GOSS) dan *Exclusive Feature Bundling* (EFB). GOSS berfungsi dengan memprioritaskan data yang memiliki

gradien besar yang menunjukkan kesalahan prediksi tinggi dan mengabaikan sebagian data dengan gradien kecil untuk mengurangi beban komputasi tanpa kehilangan informasi penting. Di sisi lain, EFB bertujuan mengurangi dimensi fitur dengan cara menggabungkan fitur-fitur yang saling eksklusif (tidak aktif bersamaan) ke dalam satu kelompok fitur baru (Ke *et al.*, 2017).

Perbedaan utama antara LightGBM dan *Gradient Boosting* lain seperti XGBoost terletak pada cara masing-masing algoritma meningkatkan performa *Gradient Boosting*. XGBoost melakukan pemrosesan secara paralel dengan memanfaatkan banyak inti pada CPU melalui distribusi perhitungan, optimalisasi *cache*, dan kemampuan *out-of-core processing*. Sementara itu, LightGBM menerapkan strategi pertumbuhan pohon *leaf-wise*, bukan *level-wise* seperti XGBoost, yang membuatnya lebih efisien dalam menemukan *split* dengan *loss* terkecil dan lebih cepat dalam proses pelatihan (Chen *et al.*, 2019).

Meskipun LightGBM memiliki keunggulan efisiensi teoretis, implementasinya dalam beberapa penelitian terapan menunjukkan adanya tantangan yang menarik. Salah satu contoh relevan adalah studi oleh Cavus dan Biecek (2022) yang memberikan kontribusi penting melalui evaluasi komparatif berbagai model modern dengan fokus pada *explainability*. Dalam kerangka kerja AutoML mereka, ditemukan kesenjangan performa yang signifikan. Model LightGBM hanya mencapai AUC 0.818, jauh di bawah model terbaik mereka, *Random Forest*, yang mencapai AUC 0.985. Kesenjangan ini, bagaimanapun, bukanlah indikasi bahwa LightGBM adalah algoritma yang lebih lemah. Sebaliknya, hal ini menyoroti bahwa fokus utama penelitian tersebut adalah pada

interpretasi model (XAI), bukan pada *performance tuning*. Pendekatan AutoML yang digunakan tidak melakukan eksplorasi dan optimasi *hyperparameter* secara mendalam yang spesifik untuk LightGBM. Oleh karena itu, potensi akurasi LightGBM yang sesungguhnya belum tergali sepenuhnya. Celah penelitian inilah yang menjadi justifikasi utama bagi penelitian ini untuk melakukan *tuning* dan kalibrasi mendalam pada model LightGBM, guna membuktikan dan mengoptimalkan performa prediktifnya.

Penelitian ini menggunakan data yang bersumber dari StatsBomb *Open Data*, sebuah *dataset* publik yang secara resmi dirilis oleh perusahaan StatsBomb untuk mendorong kegiatan penelitian akademik dan pengembangan analisis dalam dunia sepak bola. *Dataset* ini tersedia untuk publik dan mencakup berbagai liga serta kompetisi ternama, termasuk Liga Inggris, *La Liga*, *Liga Champions*, dan Piala Dunia. Ketersediaan data *granular* seperti lokasi tembakan, posisi pemain, jenis aksi sebelum tembakan, hingga *freeze frame* menjadikan StatsBomb *Open Data* sebagai salah satu sumber yang sangat relevan dalam membangun model prediktif seperti xG. Penggunaan *dataset* ini selaras dengan misi StatsBomb dalam "*encouraging academic research and analysis through open access to high-quality football data*" (StatsBomb, 2022).

StatsBomb sendiri merupakan perusahaan penyedia data olahraga yang berbasis pada analisis dan riset, didirikan oleh para analis sepak bola profesional untuk memenuhi kebutuhan para analis pula. Mereka memiliki visi untuk menyajikan data sepak bola paling komprehensif di dunia, baik dalam aspek kuantitas maupun relevansi, yang dikumpulkan secara presisi dan dapat disesuaikan

dengan kebutuhan riset lanjutan. Dalam pernyataan resminya, StatsBomb menyatakan bahwa platform mereka dibangun dari nol untuk menjamin fleksibilitas dalam menghadapi tantangan dan peluang baru di dunia olahraga yang terus berkembang (StatsBomb, 2024). Dengan pendekatan berbasis teknologi dan kedalaman data yang tidak dimiliki penyedia lain, StatsBomb menjadi rujukan utama dalam banyak riset akademik dan industri. Gambar 1.2 berikut menampilkan logo resmi dari perusahaan StatsBomb yang menjadi sumber data utama dalam penelitian ini.



Gambar 1.2 Logo Statsbomb

Berdasarkan latar belakang serta pedoman dari penelitian-penelitian sebelumnya, penulis menyimpulkan bahwa terdapat kebutuhan untuk mengembangkan model xG dengan algoritma yang lebih efisien dan akurat. LightGBM, dengan kemampuan dan keunggulannya dalam menangani *big data*, menawarkan peluang untuk menghasilkan model yang lebih baik dibandingkan model tradisional atau algoritma lain yang telah diterapkan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan sebagai upaya inovatif dalam analisis sepak bola dengan mengimplementasikan LightGBM untuk xG. Pengembangan model xG ini tidak hanya berkontribusi pada analisis performa teknis, tetapi juga berimplikasi sebagai komponen penting dalam sistem informasi analitik klub, yang mendukung pengambilan keputusan strategis, mulai dari evaluasi pemain hingga alokasi sumber daya demi meningkatkan daya saing dan nilai bisnis klub. Dengan demikian, tugas



akhir ini disusun dengan judul: "**PENERAPAN *LIGHT GRADIENT BOOSTING MACHINE (LIGHTGBM)* UNTUK PREDIKSI NILAI *EXPECTED GOALS (XG)* DALAM ANALISIS SEPAK BOLA**"

## 1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, berikut merupakan identifikasi masalah pada penelitian ini:

- a. Berbagai algoritma seperti regresi logistik, CRF, dan sejenisnya, yang selama ini digunakan untuk membangun model xG, cenderung kesulitan mengakomodasi data spasial yang memiliki hubungan non-linear, serta menunjukkan rendahnya efisiensi dan skalabilitas saat menangani volume data yang besar.
- b. Dengan semakin lengkapnya data spasial dan teknis sepak bola yang tersedia, diperlukan model yang mampu mengintegrasikan serta mengoptimalkan pemanfaatan fitur-fitur data spasial dan teknis sepak bola agar analisis performa pemain dan strategi tim dapat dilakukan dengan lebih akurat dan cepat, yang kinerjanya akan dievaluasi menggunakan serangkaian metrik performa komprehensif meliputi *Receiver Operating Characteristic Area Under Curve (ROC AUC)*, *Brier Score*, presisi, *recall*, F1-Score, dan *Log-Loss*, serta efisiensi komputasi melalui pengukuran waktu pemrosesan.

## 1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah yang telah dipaparkan, berikut merupakan rumusan masalah pada penelitian ini:

- a. Bagaimana penerapan algoritma LightGBM untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam perhitungan xG dalam analisis sepak bola?
- b. Bagaimana performa akurasi dan efisiensi komputasi dari algoritma LightGBM dalam perhitungan xG, di mana performa akurasi diukur menggunakan metrik ROC AUC, *Brier Score*, presisi, *recall*, *F1-Score*, dan *Log-Loss*, serta efisiensi diukur melalui waktu pemrosesan model?

#### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang terdapat pada penelitian ini yaitu:

- a. Penelitian ini hanya berfokus pada implementasi LightGBM untuk perhitungan xG dalam analisis sepak bola.
- b. Data yang digunakan diambil dari Hudl StatsBomb *open-data* yang berlisensi resmi oleh StatsBomb Services Ltd yang berkantor pusat di University of Bath Innovation Centre, Carpenter House, Broad Quay, Bath, BA1 1UD.
- c. Data terbatas pada *event* data statistik pertandingan, termasuk posisi, jarak, teknik, sudut tembakan dan lainnya.
- d. Penelitian ini fokus pada perhitungan xG menggunakan LightGBM tanpa membandingkan dengan model lain.
- e. *Preprocessing* dilakukan menggunakan *Python*, fokus pada pembersihan dan transformasi data.

- f. Data dibagi untuk *training* dan *testing* dengan validasi silang hanya pada kalibrasi model.
- g. Evaluasi performa model terbatas pada pengukuran akurasi menggunakan metrik ROC AUC, Brier Score, presisi, *recall*, *F1-Score*, dan *Log-Loss*, serta pengukuran efisiensi komputasi berdasarkan waktu pemrosesan.

### 1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Penerapan LightGBM dalam upaya meningkatkan akurasi dan efisiensi perhitungan metrik xG pada analisis sepak bola.
- b. Evaluasi performa model LightGBM dengan mengukur akurasi prediksi melalui metrik ROC AUC, *Brier Score*, presisi, *recall*, *F1-Score*, dan *Log-Loss*, serta mengukur efisiensi komputasi berdasarkan waktu pemrosesan.

### 1.6 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

- a. Bagi peneliti, penelitian ini merupakan implementasi dari teori yang telah dipelajari dalam bidang analisis data dan *machine learning*, sehingga dapat lebih memahami penerapan algoritma LightGBM dalam perhitungan metrik xG. Selain itu, penelitian ini juga merupakan salah satu syarat kelulusan Strata Satu (S1) Sistem Informasi UIN Syarif Hidayatullah Jakarta.
- b. Bagi Universitas, penelitian ini dapat dijadikan sebagai tolak ukur pengetahuan mahasiswa terkait penerapan algoritma *machine learning* dalam analisis sepak

bola, serta sebagai kontribusi dalam pengembangan penelitian di bidang ilmu komputer dan sistem informasi.

- c. Bagi pembaca, penelitian ini dapat memberikan informasi yang komprehensif mengenai algoritma LightGBM dan aplikasinya dalam perhitungan xG, serta dapat dijadikan sebagai referensi tambahan terkait penelitian dalam Program Studi Sistem Informasi UIN Syarif Hidayatullah Jakarta, khususnya dalam konteks analisis data olahraga. Penelitian ini juga dapat memberikan pemahaman tentang pentingnya analisis data dalam pengambilan keputusan dalam sepak bola.

## 1.7 Metode Penelitian

Metode penelitian ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu:

- a. Pengumpulan Data

- 1) Studi Literatur

Metode studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan dan menganalisis berbagai sumber tertulis, seperti buku, artikel ilmiah, dan laporan penelitian yang relevan dengan topik penelitian.

- 2) *Data Extraction*

*Data extraction* adalah proses pengambilan data dari berbagai sumber untuk dianalisis lebih lanjut. Dalam penelitian ini, data yang digunakan diambil dari StatsBomb *open-data* yang tersedia di GitHub dengan lisensi resmi.

- b. Analisis Data

Penelitian ini menggunakan metode data *mining* yang dikenal sebagai *Knowledge Discovery in Databases* (KDD). Metode KDD terdiri atas beberapa tahap yang saling berhubungan, sebagai berikut:

1) *Data Selection*

*Data selection* adalah proses pemilihan sub set data yang relevan dari kumpulan data yang lebih besar untuk analisis lebih lanjut. Dalam penelitian ini, pemilihan data difokuskan pada informasi yang terkait dengan tembakan dan peluang gol, sehingga dapat digunakan dalam perhitungan metrik xG.

2) *Preprocessing*

*Preprocessing* adalah langkah yang dilakukan untuk menyiapkan dan membersihkan data sebelum analisis. Ini melibatkan penghapusan data yang tidak relevan, pengisian nilai yang hilang, dan perubahan format data agar sesuai dengan kebutuhan analisis. Tahap ini penting untuk memastikan bahwa data yang digunakan dalam penelitian akurat dan dapat diandalkan.

3) *Data Transformation*

*Data transformation* adalah proses mengubah data ke dalam format yang lebih sesuai untuk analisis. Ini termasuk teknik seperti normalisasi, pengkodean variabel kategorial, dan agregasi data. Proses ini memungkinkan model *machine learning* untuk memproses data dengan lebih efisien dan efektif.

4) *Data Mining*

Pada tahap *data mining*, penelitian ini menggunakan algoritma LightGBM untuk membangun model prediktif berdasarkan data yang telah diproses. LightGBM dipilih karena kemampuannya dalam menangani data besar dengan efisiensi tinggi, serta akurasi yang dihasilkannya dalam perhitungan xG.

#### 5) *Evaluation*

Setelah model dibangun, evaluasi performa dilakukan secara komprehensif menggunakan serangkaian metrik. Metrik utama yang digunakan adalah ROC AUC untuk mengukur kemampuan diskriminasi dan *Brier Score* untuk mengukur akurasi probabilitas. Selain itu, evaluasi juga dilengkapi dengan metrik klasifikasi standar seperti presisi, *recall*, *F1-Score*, serta metrik kesalahan tambahan yaitu *Log-Loss* untuk memastikan analisis yang *robust*.

### 1.8 Sistematika Penulisan

Laporan pada penelitian ini terdiri atas lima bab, yaitu:

#### **BAB 1        PENDAHULUAN**

Bab ini membahas tentang latar belakang, identifikasi masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan dari penelitian ini.

#### **BAB 2        TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini membahas tentang teori-teori yang berkaitan dengan metrik xG dalam sepak bola, serta penerapan algoritma LightGBM dalam

model prediksi, termasuk tinjauan mengenai penelitian-penelitian terdahulu yang relevan.

### **BAB 3           METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini menjelaskan tentang tahapan metode yang digunakan dalam penelitian, meliputi metode pengumpulan data, proses *preprocessing*, analisis data, dan implementasi menggunakan algoritma LightGBM, serta tahapan evaluasi dengan metrik ROC AUC dan *Brier Score*.

### **BAB 4           HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini berisi hasil dari penerapan algoritma LightGBM dalam perhitungan metrik xG, serta analisis mendalam mengenai kinerja model berdasarkan evaluasi yang dilakukan. Hasil juga dibandingkan dengan model lain untuk menunjukkan efektivitas LightGBM.

### **BAB V          PENUTUP**

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian mengenai penerapan algoritma LightGBM dalam perhitungan metrik xG, serta saran-saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya dalam bidang analisis sepak bola dan penerapan *machine learning*.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1    *Expected Goals (xG)***

*Expected Goals* atau xG adalah salah satu metrik yang semakin digunakan dalam analisis sepak bola modern untuk menilai peluang terjadinya gol berdasarkan kualitas dan lokasi tembakan yang dilakukan (Mead, O'Hare, & McMenemy, 2023). Metrik ini memberikan prediksi probabilitas yang lebih akurat dibandingkan statistik konvensional dalam memperkirakan keberhasilan suatu tim di masa mendatang. Dalam hal ini, xG membantu memberikan pandangan yang lebih obyektif dan berbasis data mengenai kemungkinan pencapaian gol yang dihasilkan dari berbagai jenis tembakan selama pertandingan.

Metrik xG dirancang untuk memberikan skor probabilistik pada setiap tembakan, dengan nilai yang berkisar antara 0 dan 1, di mana 0 menunjukkan tidak ada peluang mencetak gol, dan 1 menunjukkan kepastian terjadinya gol. Penilaian ini memungkinkan xG untuk menangani unsur ketidakpastian dalam sepak bola dengan lebih baik dibandingkan metrik berbasis gol konvensional. Karena tembakan jauh lebih sering terjadi daripada gol, pendekatan ini memungkinkan analisis yang lebih stabil dan realistis dalam memahami efektivitas tim dan pemain di lapangan (Mead, O'Hare, & McMenemy, 2023).

Selain berguna untuk analisis taktis yang mendukung peningkatan performa di lapangan, xG juga memainkan peran penting dalam keputusan finansial klub. Metrik ini membantu dalam keputusan seperti perekrutan pemain dan negosiasi



kontrak dengan memberikan wawasan yang lebih akurat mengenai kontribusi pemain. Dengan demikian, xG tidak hanya membantu klub dalam memaksimalkan performa di lapangan tetapi juga dalam mengelola sumber daya finansial secara lebih efisien (Mead, O'Hare, & McMenemy, 2023).

Penerapan xG memberikan keuntungan strategis bagi klub sepak bola dengan memperluas pemahaman terkait kualitas peluang yang dihasilkan. Hal ini memungkinkan klub untuk mengevaluasi kinerja pemain secara lebih mendalam dan membantu dalam pengembangan strategi permainan yang berbasis pada kualitas dan efektivitas peluang (Mead, O'Hare, & McMenemy, 2023). Oleh karena itu, xG melampaui perannya sebagai metrik statistik.

Di dalam konsepnya, perhitungan xG dapat dianggap sebagai permasalahan klasifikasi, karena melibatkan penentuan probabilitas tembakan menghasilkan gol berdasarkan berbagai faktor. Untuk menghitung probabilitas ini, metode *machine learning* dan statistika sering diterapkan, termasuk *logistic regression*, *gradient boosting*, *neural networks*, *support vector machines*, serta algoritma klasifikasi *tree-based*. Beragam pendekatan ini memungkinkan xG untuk memanfaatkan data historis dan pola dalam data tembakan untuk memodelkan kemungkinan gol secara lebih akurat, yang berguna dalam memberikan penilaian yang lebih detail tentang kualitas peluang tembakan (Herbinet, 2018).

Model xG dapat memiliki tingkat akurasi yang berbeda tergantung pada jumlah faktor yang dimasukkan ke dalam perhitungannya. Sebagai contoh, model xG biasanya memperhitungkan jarak tembakan ke gawang, sudut tembakan, bagian tubuh yang digunakan, dan jenis umpan yang mendahului tembakan.

Berdasarkan faktor-faktor tersebut, sebuah tembakan mungkin diberi nilai 0,30 xG. namun model yang lebih presisi, seperti Statsbomb xG, mempertimbangkan informasi tambahan seperti posisi kiper, status kiper, posisi pemain bertahan dan penyerang, serta tinggi dampak tembakan. Dalam kondisi kiper yang tidak berada di posisinya, model ini mungkin memberikan nilai yang lebih tinggi, misalnya 0,65 xG, untuk menggambarkan kualitas peluang yang lebih tinggi (Statsbomb, 2024).

Visualisasi dari model ini pada Gambar 2.1, yang merupakan visualisasi xG pada pertandingan langsung, memperlihatkan bagaimana setiap faktor dihitung untuk menghasilkan prediksi xG yang mendalam dan akurat.



Gambar 2.1 Visualisasi xG pada Pertandingan Langsung (Statsbomb, 2024)

## 2.2 Sepak Bola

Sepak bola merupakan olahraga tim yang dimainkan secara global, menuntut pemain untuk menguasai berbagai kemampuan teknis, taktis, dan fisik dalam lingkungan yang dinamis dan kompetitif. Permainan ini pada dasarnya

melibatkan dua tim yang saling berhadapan, di mana setiap tim berusaha untuk mencetak gol dengan memasukkan bola ke gawang lawan menggunakan bagian tubuh mana pun selain tangan atau lengan (Sarmiento *et al.*, 2014). Sifat permainan yang kompleks dan interaktif ini menjadikan sepak bola sebagai subjek yang kaya untuk dianalisis dari berbagai perspektif ilmiah, mulai dari fisiologi hingga analisis data performa.

Sebuah pertandingan sepak bola standar dimainkan dalam dua babak yang masing-masing berdurasi 45 menit, dengan tujuan utama untuk mencetak skor lebih tinggi dari tim lawan. Setiap tim terdiri dari pemain yang menempati posisi-posisi strategis, seperti penjaga gawang yang bertugas melindungi gawang, pemain bertahan yang menghalau serangan lawan, pemain tengah yang mengatur alur permainan, serta penyerang yang berfokus untuk menciptakan peluang dan mencetak gol. Keberhasilan sebuah tim tidak hanya ditentukan oleh kemampuan individu, tetapi juga oleh kohesi dan koordinasi kolektif dalam menjalankan strategi permainan di bawah kerangka aturan yang diawasi oleh wasit (Carling, Williams, & Reilly, 2005).

### **2.3 Analisis Sepak Bola**

Analisis sepak bola merupakan proses yang kompleks dan melibatkan berbagai aspek dari permainan yang saling terkait. Secara mendasar, analisis ini mencakup pengukuran komunikasi antar pemain, kemampuan adaptasi, tempo permainan, serta evaluasi taktik penyerangan dan pertahanan (Mclean *et al.*, 2017). Analisis ini memperhitungkan dimensi sosial dan teknis dalam sepak bola, di mana

pemahaman akan sistem permainan sangat penting dalam mengoptimalkan kinerja tim secara keseluruhan.

Lebih jauh, analisis dalam sepak bola tidak hanya fokus pada aspek teknis dan taktis, tetapi juga memperhatikan variabel fisik yang relevan dalam konteks permainan sepak bola pria dewasa. Di samping itu, terdapat variabel situasional yang perlu diperhatikan seperti lokasi pertandingan, kualitas lawan, dan status pertandingan yang berpengaruh pada performa tim (Sarmiento *et al.*, 2014). Faktor-faktor ini menambah kompleksitas analisis dan menekankan pentingnya pendekatan menyeluruh yang mempertimbangkan kondisi dinamis permainan.

Dalam upaya meningkatkan performa pemain dan mengembangkan aktivitas pelatih, analisis sepak bola juga mengarah pada aspek-aspek mendetail seperti performa dalam situasi bola mati, perilaku sistem kolektif, komunikasi tim, dan profil aktivitas pemain. Fokus ini bertujuan untuk memberikan wawasan yang lebih dalam mengenai pola-pola permainan serta interaksi pemain di lapangan, yang pada akhirnya membantu pelatih dalam menyesuaikan strategi berdasarkan analisis berbasis data yang komprehensif (Sarmiento *et al.*, 2018).

Salah satu contoh penerapan analisis sepak bola yang semakin populer adalah penggunaan *data tracking* pemain. Data ini memungkinkan analisis yang lebih mendalam terhadap struktur permainan dengan memberikan wawasan mengenai performa tim, terutama dalam strategi bertahan. Implementasi analisis ini mengidentifikasi karakteristik permainan defensif yang berhasil, ditandai dengan tekanan tinggi, sinkronisasi gerakan antar pemain, keseimbangan pertahanan, serta organisasi pertahanan yang kompak dan terkoordinasi. Melalui *data tracking*,

pelatih dan analis dapat memahami pola pertahanan yang efektif dan mengoptimalkan strategi tim berdasarkan perilaku lapangan yang terukur (Forcher *et al.*, 2022).

## 2.4 *Machine learning*

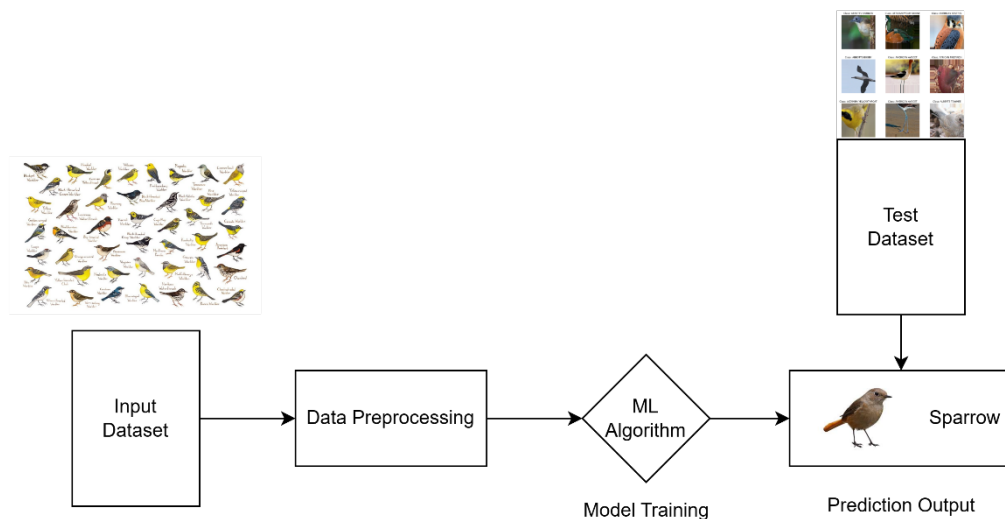
*Machine learning* (ML) merupakan kemampuan suatu sistem untuk belajar dari data pelatihan yang spesifik terhadap masalah tertentu, dengan tujuan untuk mengotomatisasi proses pembangunan model analitik serta memecahkan tugas-tugas terkait. Dalam konteks ini, ML memungkinkan sistem komputer untuk mengidentifikasi pola dalam data tanpa campur tangan manual yang intensif, sehingga memungkinkan solusi otomatis terhadap berbagai masalah kompleks berbasis data (Janiesch *et al.*, 2021).

Secara lebih mendalam, ML dapat dilihat sebagai bentuk kecerdasan buatan (AI) yang memanfaatkan data untuk melatih komputer dalam melakukan berbagai tugas tertentu, menggunakan algoritma untuk membangun serangkaian aturan secara otomatis. Proses ini memungkinkan sistem untuk secara mandiri mengenali pola serta membuat keputusan berdasarkan data tanpa perlu diinstruksikan secara eksplisit, yang pada akhirnya meningkatkan ketepatan dan efisiensi sistem dalam memecahkan masalah kompleks (Schneider & Guo, 2018).

ML berbeda dari data *mining* dan statistik tradisional, baik dalam aspek filosofis maupun metodologis. Terdapat tiga pendekatan utama dalam ML yang membedakannya, yaitu statistika klasik, teori pembelajaran statistik Vapnik, serta teori pembelajaran komputasional (Kodama *et al.*, 2023). Ketiga pendekatan ini

menyediakan dasar yang berbeda untuk pengembangan algoritma, dimana ML fokus pada kemampuan untuk terus memperbaiki kinerja model berdasarkan data pelatihan, dibandingkan hanya melakukan analisis data historis sebagaimana dalam statistik tradisional.

Terdapat berbagai kategori dalam ML, meliputi *supervised learning*, *unsupervised learning*, dan *reinforcement learning*. Masing-masing pendekatan ini memiliki teknik-teknik unik, seperti *zero-shot learning*, *active learning*, *contrastive learning*, *self-supervised learning*, dan *semi-supervised learning* (Mahadevkar *et al.*, 2022). Dalam Gambar 2.2, ditunjukkan contoh implementasi *supervised learning*, di mana model dilatih menggunakan data berlabel untuk dapat mengklasifikasikan atau memprediksi berdasarkan pola yang telah dikenali. Teknik-teknik ini memperkaya cara sistem mempelajari data visual, baik dengan data yang memiliki label atau tanpa label.



Gambar 2.2 Contoh Implementasi *Supervised Learning* (Mahadevkar *et al.*, 2022)

Algoritma dasar dalam ML sangat beragam, mencakup *decision tree*, *Random Forest*, *artificial neural network*, *support vector machine* (SVM), serta algoritma *boosting* dan *bagging*, yang membantu dalam meningkatkan kinerja model dengan menggabungkan prediksi dari beberapa model. Selain itu, algoritma *backpropagation* (BP) berperan penting dalam *neural networks* untuk mengoptimalkan bobot model berdasarkan kesalahan yang dihasilkan pada prediksi awal, sehingga meningkatkan kemampuan sistem dalam memprediksi hasil dengan lebih akurat (Jin, 2020).

Dalam ML, metrik evaluasi adalah instrumen logis dan matematis yang digunakan untuk mengukur seberapa dekat hasil prediksi model terhadap nilai aktualnya. Metrik evaluasi memungkinkan analisis kinerja model secara mendalam, sehingga aspek seperti akurasi, kesalahan, dan ketepatan dalam memprediksi dapat diukur secara kuantitatif. Hal ini penting untuk memahami performa model dan menentukan langkah-langkah penyempurnaan lebih lanjut dalam pengembangan model (Plevris *et al.*, 2022).

Beberapa metrik evaluasi yang paling sering digunakan dalam ML mencakup *Root Mean Squared Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), *Pearson Correlation Coefficient*, dan *Coefficient of Determination* ( $R^2$ ) (Plevris *et al.*, 2022). Metrik-metrik ini membantu dalam mengukur seberapa akurat dan presisi prediksi model terhadap data yang diujikan, sehingga para praktisi dapat memilih metrik evaluasi yang paling relevan dengan konteks data dan tujuan analisis mereka.

## 2.5 Gradient Boosting

*Gradient boosting* merupakan teknik *machine learning* yang sangat efektif dan sering digunakan untuk menangani tugas dengan fitur heterogen serta data yang cenderung *noise*. Teknik ini bekerja dengan menggabungkan prediksi dari sejumlah model sederhana atau *weak learners* untuk menghasilkan prediksi yang kuat. Dalam klasifikasi, *Gradient boosting* menghasilkan distribusi pada label kelas, sementara dalam regresi, model ini memberikan prediksi nilai tunggal atau *point prediction* untuk mendekati hasil yang diinginkan. Kemampuan *gradient boosting* dalam menghadapi variasi pada fitur dan ketidakpastian dalam data menjadikannya alat yang sangat kuat dalam berbagai aplikasi *machine learning* (Ustimenko, Prokhorenkova, & Malinin, 2021).

Proses *gradient boosting* dimulai dengan mengombinasikan *weak learners*, yaitu model yang performanya sedikit lebih baik dari prediksi acak, untuk membentuk *strong learner* secara iteratif. *gradient boosting* merupakan algoritma *boosting* yang dirancang khusus untuk masalah regresi.

Dalam algoritma ini, diberikan kumpulan data pelatihan  $D = \{x_i, y_i\}_1^N$ , dengan tujuan utama mencari aproksimasi  $\hat{F}(x)$  dari fungsi  $F^*(x)$ , yang memetakan instance  $x$  ke nilai output  $y$ , melalui minimisasi nilai ekspektasi dari fungsi loss tertentu  $L(y, F(x))$ . *Gradient boosting* membangun aproksimasi tambahan dari  $F^*(x)$  sebagai jumlah berbobot dari sejumlah fungsi, sehingga memungkinkan model meningkatkan akurasi prediksi melalui iterasi yang berfokus pada mengurangi kesalahan residu (Bentéjac, Csörgő, & Martínez-Muñoz, 2020).



Pada persamaan (2.1) menunjukkan bagaimana setiap model baru ( $x$ ) ditambahkan secara bertahap dengan bobot pada iterasi ke- $m$ , yang bertujuan untuk mengurangi kesalahan prediksi dari model sebelumnya.

$$F_m(x) = F_{m-1}(x) + \rho_m h_m(x) \quad (2.1)$$

Dalam proses iteratif *gradient boosting*,  $\rho_m$  adalah bobot yang diberikan pada fungsi ke- $m$ , yaitu  $h_m(x)$ . Fungsi-fungsi ini merupakan model-model dalam *ensemble*, seperti *decision tree*. Aproksimasi dari  $F^*(x)$  dibangun secara bertahap, dimulai dengan mendapatkan aproksimasi konstan untuk  $F^*(x)$  pada iterasi pertama. Hal ini dicapai dengan meminimalkan nilai *loss function*  $L(y_i, \alpha)$  untuk setiap data pelatihan, dengan  $\alpha$  adalah parameter konstanta yang mengoptimalkan fungsi tersebut. Pada iterasi pertama, aproksimasi ini diberikan oleh persamaan (2.2).

$$F_0(x) = \underset{\alpha}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^N L(y_i, \alpha) \quad (2.2)$$

Persamaan (2.2) menunjukkan bahwa pada awalnya, model menghasilkan prediksi yang didasarkan pada nilai konstanta  $\alpha$  yang meminimalkan kesalahan prediksi keseluruhan,  $L(y_i, \alpha)$ , di seluruh *dataset*. Pendekatan ini digunakan untuk membangun dasar dari model *gradient boosting* sebelum melanjutkan ke iterasi selanjutnya, di mana model-model tambahan (seperti *decision tree*) akan berfungsi untuk memperbaiki prediksi dari model sebelumnya (Bentéjac, Csörgő, & Martínez-Muñoz, 2020).

Pada iterasi selanjutnya, model yang dibangun diharapkan dapat meminimalkan fungsi pada persamaan (2.3).

$$(\rho_m, h_m(x)) = \operatorname{argmin}_{\rho, h} \sum_{i=1}^N L(y_i, F_m - 1(x_i) + \rho h(x_i)) \quad (2.3)$$

Namun, alih-alih menyelesaikan masalah optimisasi ini secara langsung, setiap model  $h_m$  dapat dipandang sebagai langkah *greedy* dalam optimisasi menggunakan metode *gradient descent* untuk  $F^*$ . Untuk itu, setiap model  $h_m$  dilatih menggunakan *dataset* baru  $D = \{x_i, r_{mi}\}_{i=1}^N$ , di mana *residual* palsu  $r_{mi}$  dihitung berdasarkan turunan dari fungsi *loss*  $L(y, F(x))$  terhadap  $F(x)$ , yang dievaluasi pada  $F(x) = F_{m-1}(x)$ , dengan rumus yang ditunjukkan pada persamaan (2.4).

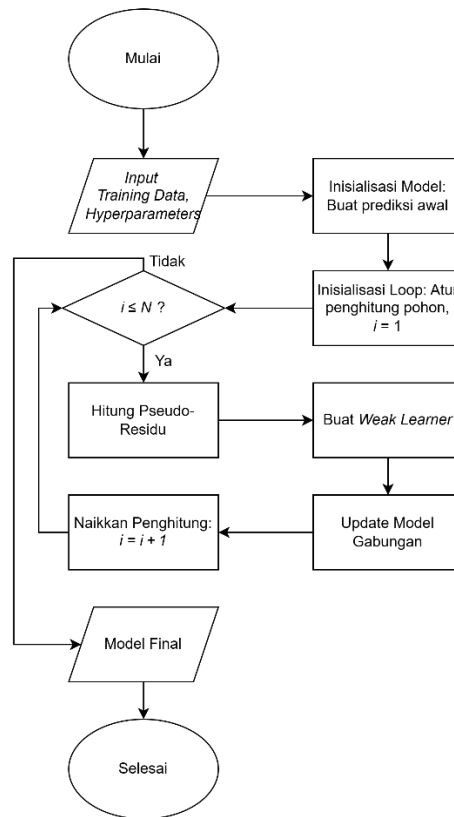
$$r_{mi} = \left[ \frac{\partial L(y_i, F(x))}{\partial L(x)} \right]_{F(x)=F_{m-1}(x)} \quad (2.4)$$

Nilai dari  $\rho_m$  kemudian dihitung dengan menyelesaikan masalah optimisasi pencarian garis. Proses ini, meskipun sangat efektif, dapat mengalami *overfitting* jika langkah-langkah iteratif tidak diatur dengan benar. Beberapa fungsi *loss* (misalnya *loss* kuadratik) dapat menyebabkan *residual* palsu menjadi nol pada iterasi berikutnya jika model  $h_m$  sangat cocok dengan *residual* palsu, yang akan menyebabkan proses tersebut berhenti terlalu cepat. Untuk mengatasi masalah ini dan mengontrol proses penambahan dalam *gradient boosting*, beberapa parameter regularisasi dipertimbangkan. Salah satu cara alami untuk meredakan *overfitting* adalah dengan menerapkan *shrinkage*, yang berfungsi untuk mengurangi setiap langkah *gradient descent* (Bentéjac, Csörgő, & Martínez-Muñoz, 2020).

*Gradient boosting* membedakan dirinya dari metode *boosting* lainnya dengan menggabungkan konsep-konsep dari teori klasifikasi untuk estimasi dan seleksi efek prediktor dalam model regresi. Dalam hal ini, *gradient boosting*

mempertimbangkan efek acak dan menawarkan pendekatan pemodelan yang lebih organik dan tidak bias. Berbeda dengan algoritma *boosting* lainnya yang mungkin mengasumsikan hubungan linier atau terlalu bergantung pada keputusan acak dalam tahap pemilihan model, *gradient boosting* memastikan bahwa estimasi prediktor disesuaikan secara cermat dengan data, meningkatkan akurasi model secara keseluruhan (Griesbach, Säfken, & Waldmann, 2020).

Selain itu, *gradient boosting* juga menawarkan kemampuan untuk menghasilkan perbaikan pada model non-konstan, dengan menggabungkan pengetahuan sebelumnya atau wawasan fisik terkait proses yang menghasilkan data (Wozniakowski, Thompson, Gu, & Binder, 2021). Ini menjadi keunggulan lain dari *gradient boosting*, karena ia tidak hanya mengandalkan data murni, tetapi juga dapat memanfaatkan pengetahuan domain atau pemahaman fisik tentang bagaimana data tersebut terbentuk. Dengan pendekatan ini, *gradient boosting* dapat meningkatkan prediksi dalam konteks yang lebih luas, termasuk dalam situasi di mana model yang lebih sederhana mungkin gagal. Alur kerja dari algoritma *gradient boosting* tersebut diilustrasikan secara *flowchart* pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 *Flowchart Gradient Boosting* (Zhang *et al.*, 2023)

Gambar 2.3 menyajikan *flowchart* dari algoritma *Gradient Boosting*. Proses diawali dengan tahap persiapan, di mana data latih (*training data*) beserta konfigurasi *hyperparameter* (seperti jumlah pohon  $N$ ) dimasukkan ke dalam sistem. Selanjutnya, model diinisialisasi dengan membuat sebuah prediksi awal yang menjadi dasar bagi iterasi berikutnya.

Alur kerja kemudian memasuki sebuah perulangan utama yang dikontrol oleh kondisi  $i \leq N$ , yang memastikan proses akan berjalan sebanyak  $N$  kali. Pada setiap iterasi, langkah pertama adalah menghitung pseudo-residu, yaitu selisih atau kesalahan (*error*) dari prediksi model gabungan saat ini terhadap nilai target sebenarnya. Residu ini kemudian menjadi target pembelajaran bagi sebuah *Weak*

*Learner* (model lemah) baru yang akan dilatih. Setelah model lemah tersebut terbentuk, ia ditambahkan untuk memperbarui (*update*) model gabungan, sehingga secara bertahap memperbaiki akurasi. Terakhir, penghitung iterasi (*i*) dinaikkan satu tingkat.

Proses iteratif ini terus berlanjut hingga semua  $N$  model lemah selesai dibangun. Setelah keluar dari perulangan, alur kerja menghasilkan sebuah Model Final, yang merupakan ansambel (gabungan) kuat dari seluruh model lemah yang telah dilatih secara sekuensial. Proses kemudian berakhir (Selesai).

Sebagai algoritma *ensemble learning* yang semakin berkembang, telah terbukti unggul dalam meningkatkan prediksi dibandingkan dengan model lain, seperti *artificial neural network*, terutama dalam konteks pemodelan dinamis *bioprocess* (Mowbray *et al.*, 2020). Dalam penerapan ini, *gradient boosting* menggabungkan beberapa model pembelajaran yang lemah untuk menghasilkan prediksi yang lebih akurat, menunjukkan keunggulannya dalam memodelkan dan memprediksi proses yang dinamis dan kompleks, serta mampu mengatasi variasi yang ada dalam data yang digunakan.

Beberapa parameter dalam *gradient boosting*, seperti jumlah *node*, kedalaman maksimum, dan tingkat pembelajaran, dapat disesuaikan berdasarkan kinerja model pada *testing* set (Hu *et al.*, 2023). Pengaturan parameter ini penting untuk memastikan model tidak hanya memberikan prediksi yang akurat, tetapi juga menghindari *overfitting*. Menyesuaikan parameter-parameter tersebut memungkinkan pemodel untuk mengoptimalkan performa model sesuai dengan

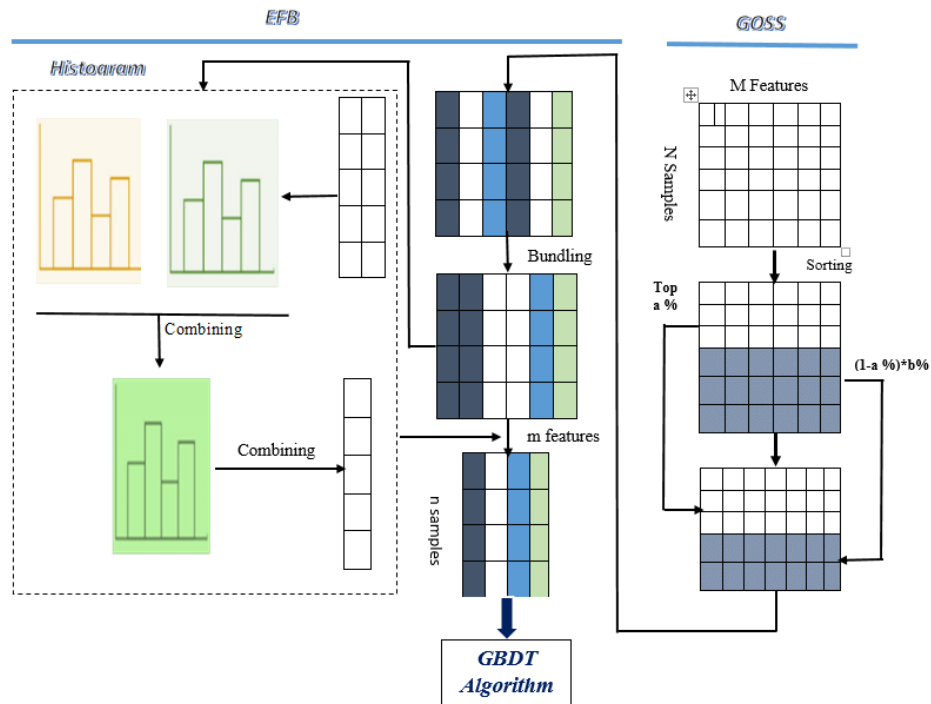
karakteristik data yang digunakan, menjadikannya lebih fleksibel dan dapat diandalkan dalam berbagai jenis aplikasi.

## 2.6 *Light Gradient Boosting Machine*

*Light Gradient Boosting Machine* (LightGBM) adalah sebuah implementasi *gradient boosting* berkinerja tinggi yang didasarkan pada algoritma *Gradient Boosting Decision Tree* (GBDT), namun disempurnakan dengan teknik-teknik inovatif untuk meningkatkan kecepatan dan efisiensi. LightGBM memiliki beberapa keunggulan, termasuk kecepatan pelatihan yang lebih tinggi, penggunaan memori yang lebih rendah, akurasi yang lebih baik, serta dukungan untuk distribusi data dalam jumlah besar. LightGBM dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan dalam GBDT tradisional, khususnya dalam hal kinerja dan efisiensi komputasi, sehingga memungkinkan pelatihan model pada *dataset* yang lebih besar dengan waktu yang lebih singkat (Huang & Chen, 2023).

LightGBM pertama kali dikembangkan pada tahun 2016 oleh tim peneliti di Microsoft sebagai peningkatan atas model GBDT yang populer, yaitu XGBoost. LightGBM diperkenalkan untuk meningkatkan efisiensi dan kecepatan yang lebih tinggi dari XGBoost, yang sering mengalami kendala kecepatan pada data berukuran besar. Dalam pengembangan LightGBM, tim peneliti memperkenalkan dua teknik baru: *Gradient-based One-Side Sampling* (GOSS) dan *Exclusive Feature Bundling* (EFB). Teknik ini dirancang untuk mengurangi jumlah sampel data dan fitur yang perlu diproses dalam pelatihan GBDT, sehingga mengatasi tantangan komputasi yang terkait dengan pemrosesan *dataset* besar (Kriuchkova,

Toloknova, & Drin, 2024). Gambar 2.4 adalah arsitektur peningkatan algoritma GBDT dengan EFB dan GOSS.



Gambar 2.4 Arsitektur GOSS dan EFB

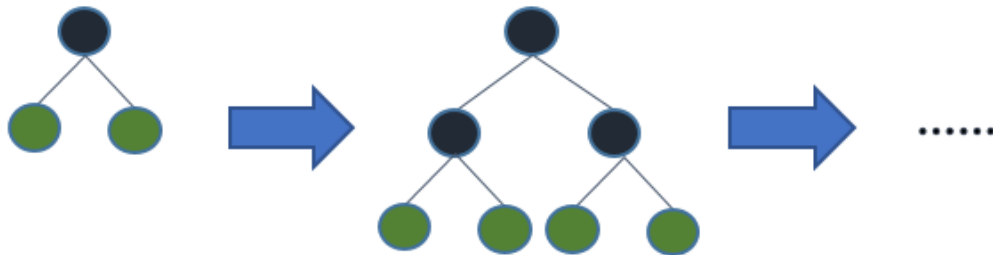
Pada Gambar 2.4 disajikan arsitektur dan aliran data dalam kerangka kerja GBDT pada LightGBM yang ditingkatkan, mengintegrasikan teknik EFB dan GOSS. EFB bertujuan untuk mengurangi dimensi fitur dengan menggabungkan fitur-fitur yang jarang aktif bersamaan ke dalam bundel tunggal, sehingga menghasilkan matriks fitur yang lebih ringkas ( $m$  fitur dari  $M$  fitur awal). Proses ini melibatkan pembentukan histogram untuk setiap fitur dan kemudian menggabungkannya, yang secara efektif mengurangi kompleksitas komputasi tanpa mengorbankan informasi signifikan. Matriks fitur yang telah dibundel kemudian disatukan dengan sampel-sampel yang telah diseleksi oleh GOSS.

Sementara itu, GOSS mengatasi tantangan jumlah sampel yang besar dengan secara selektif mempertahankan instansi berdasarkan gradiennya. Sampel dengan gradien besar (*top  $\alpha\%$* ) dipertahankan secara utuh karena mereka berkontribusi paling signifikan terhadap *error* model, sedangkan sampel dengan gradien kecil diambil secara acak pada laju  $(1-\alpha\%)\times b\%$ . Pendekatan ini memungkinkan algoritma GBDT untuk fokus pada sampel yang paling informatif, mempercepat proses pelatihan sambil menjaga akurasi model. Kombinasi EFB dan GOSS secara sinergis mengurangi dimensi fitur dan jumlah sampel, secara substansial meningkatkan efisiensi komputasi dari algoritma GBDT tanpa mengorbankan kinerja, menjadikannya sangat efektif untuk *dataset* skala besar.

LightGBM menunjukkan kegunaan yang sangat luas dalam berbagai bidang dan masalah. Dalam masalah penugasan tugas *multi-UAV (Unmanned Aerial Vehicle)*, model LightGBM memberikan solusi yang lebih baik dan cakupan solusi yang lebih luas dibandingkan algoritma lainnya (Wang & Zhang, 2023). Hal ini menunjukkan kemampuannya dalam menangani masalah kompleks yang melibatkan banyak variabel dan pengambilan keputusan secara bersamaan.

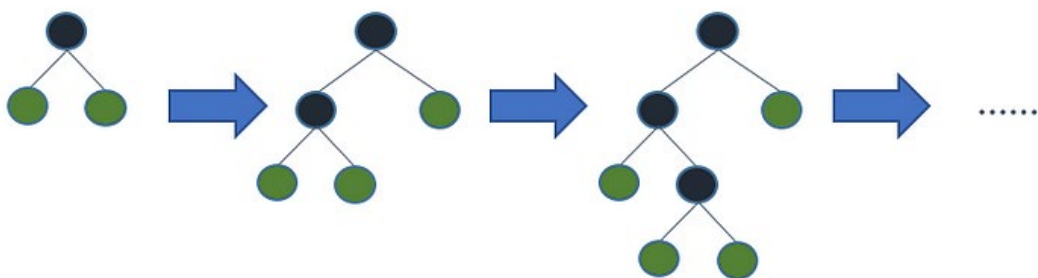
LightGBM menggunakan pendekatan yang berbeda dalam *decision tree learning* dibandingkan algoritma *decision tree* tradisional yang biasanya tumbuh berdasarkan tingkat atau kedalaman pohon (*depth-wise*). Dalam metode tradisional ini, semua *node* pada tingkat yang sama dianggap sama pentingnya, dan pohon bertumbuh secara berjenjang untuk mencakup setiap *node* pada tingkat tertentu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 (LightGBM, 2024).





Gambar 2.5 Ilustrasi *Level-wise Tree Growth* (LightGBM, 2024)

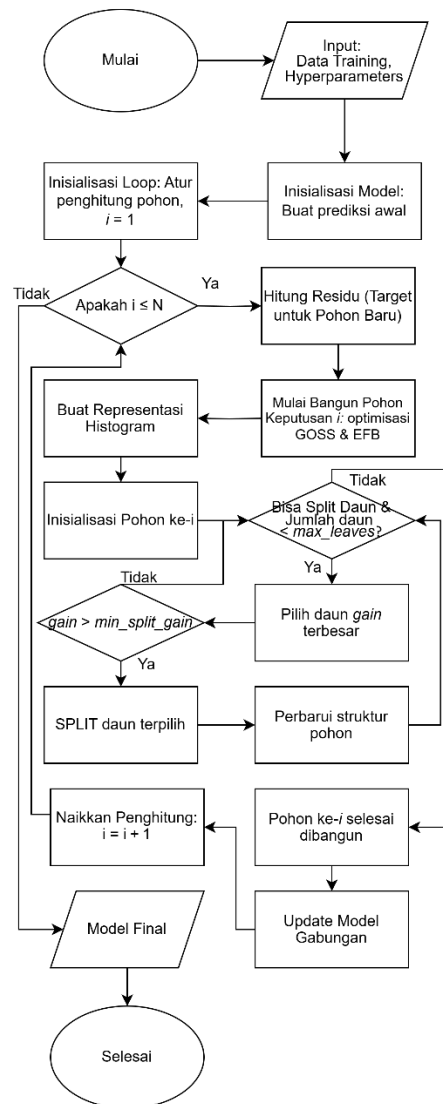
Namun, LightGBM mengadopsi strategi pertumbuhan pohon berbasis daun atau *leaf-wise*, yang hanya membagi daun yang diharapkan memberikan peningkatan terbesar terhadap akurasi model, seperti pada Gambar 2.6. Dengan fokus pada daun yang paling berpotensi untuk meningkatkan performa model, LightGBM membangun pohon secara lebih selektif dan efisien. Strategi *leaf-wise* ini bertujuan untuk memaksimalkan akurasi model dengan sumber daya yang lebih minimal, dibandingkan dengan metode tradisional yang sering kali menghasilkan cabang-cabang pohon yang tidak diperlukan dan memperlambat proses pelatihan (LightGBM, 2024).



Gambar 2.6 Ilustrasi *Leaf-wise Tree Growth* (LightGBM, 2024)

Pendekatan *leaf-wise* dalam LightGBM sering disebut juga sebagai pertumbuhan "*greedy growth*," yang memungkinkan algoritma untuk menemukan dan membagi daun dengan dampak terbesar terhadap akurasi model tanpa harus mempertimbangkan semua cabang secara merata pada setiap tingkat (LightGBM, 2024). Hal ini dapat diibaratkan seperti memangkas cabang-cabang yang tidak perlu, dengan fokus pada jalur yang paling bermanfaat. Sebagai akibat dari pendekatan yang selektif ini, struktur pohon dalam LightGBM menjadi asimetris, di mana beberapa cabang tumbuh lebih dalam daripada cabang lainnya, karena tujuan utamanya bukan simetri, melainkan peningkatan akurasi model.

Manfaat dari strategi pertumbuhan berbasis daun ini adalah dalam hal kecepatan dan akurasi (LightGBM, 2024). Dari segi kecepatan, LightGBM menjadi sangat efisien karena metode *leaf-wise* hanya membagi daun yang memberikan dampak signifikan pada model, sehingga menghindari pengembangan sub-pohon yang tidak berkontribusi banyak terhadap peningkatan akurasi. Selain itu, pertumbuhan *leaf-wise* ini cenderung menghasilkan model dengan tingkat kesalahan (*loss*) yang lebih rendah dan akurasi yang lebih tinggi, karena algoritma dapat lebih terfokus pada bagian data yang paling informatif. Hal ini menjadikan LightGBM sebagai algoritma yang unggul dalam hal efisiensi dan ketepatan dalam menangani *dataset* yang besar dan kompleks. Gambar 2.7 menunjukkan *flowchart* dari LightGBM.



Gambar 2.7 Flowchart LightGBM (Ke et al., 2017)

Gambar 2.7 menyajikan diagram alur kerja rinci dari algoritma LightGBM. Proses diawali dengan tahap inisialisasi, di mana data latih dan serangkaian *hyperparameter* seperti jumlah pohon ( $N$ ),  $max\_leaves$ , dan  $min\_split\_gain$  dijadikan sebagai masukan. Selanjutnya, model melakukan prediksi awal sebagai titik acuan dan menginisialisasi perulangan utama yang akan berjalan sebanyak  $N$  kali untuk membangun sejumlah pohon keputusan secara sekuensial.

Inti dari alur kerja ini terletak pada proses iteratifnya. Pada setiap iterasi  $i$ , algoritma terlebih dahulu menghitung nilai pseudo-residu, yang merupakan gradien dari *loss function* terhadap prediksi dari model gabungan pada iterasi sebelumnya. Nilai residu ini kemudian menjadi target pembelajaran bagi pohon keputusan baru (pohon ke- $i$ ), sehingga pohon tersebut secara spesifik dilatih untuk memperbaiki kesalahan yang masih ada. Proses ini memastikan bahwa setiap pohon yang ditambahkan ke dalam ansambel memberikan kontribusi untuk meningkatkan akurasi model secara keseluruhan.

Pembangunan setiap pohon keputusan dilakukan dengan strategi pertumbuhan *leaf-wise* yang dioptimalkan melalui GOSS dan EFB, serta penggunaan representasi berbasis histogram untuk efisiensi. Pertumbuhan pohon dikontrol secara ketat oleh mekanisme *pre-pruning*. Sebuah daun hanya akan dipecah (*split*) menjadi dua daun baru jika memenuhi dua kondisi utama: jumlah total daun pada pohon belum melampaui batas *max\_leaves*, dan perolehan informasi (*gain*) yang dihasilkan dari pemecahan tersebut harus lebih besar dari ambang batas *min\_split\_gain*. Setelah sebuah pohon selesai dibangun, struktur model gabungan diperbarui dengan menambahkan pohon baru tersebut, yang bobotnya sering kali diskalakan oleh *learning rate*.

Proses perulangan ini terus berlanjut hingga jumlah pohon yang dibangun mencapai  $N$ . Ketika kondisi perulangan tidak lagi terpenuhi, alur kerja akan menghasilkan sebuah Model Final. Model ini merupakan ansambel aditif dari prediksi awal dan seluruh pohon keputusan yang telah dilatih secara bertahap, yang kemudian siap digunakan untuk melakukan prediksi pada data baru.

Untuk mengimplementasikan LightGBM, *library* utama yang diperlukan adalah LightGBM itu sendiri, yang dapat diinstal melalui pengelola paket sesuai bahasa pemrograman yang digunakan, seperti *Python* atau R (LightGBM, 2024). Selain *library* utama tersebut, ada beberapa dependensi lain yang juga dibutuhkan, seperti CMake untuk membangun lingkungan pengembangan dan *library* CUDA jika ingin memanfaatkan akselerasi GPU untuk mempercepat proses komputasi. Dengan adanya dukungan GPU, LightGBM dapat menangani data dalam jumlah besar dengan lebih efisien, mempercepat pelatihan model secara signifikan.

Dalam pengembangan model LightGBM, kemampuan interpretasi dan keterbukaan model merupakan aspek penting, terutama untuk memahami alasan di balik prediksi yang dihasilkan. Teknik interpretasi seperti *Permutation Feature Importance* (PFI) dan *Shapley additive explanations* (SHAP) menjadi metode yang sangat berguna untuk menjelaskan kontribusi setiap fitur dalam model terhadap prediksi akhir (Chaibi *et al.*, 2021). PFI, misalnya, menilai pentingnya setiap fitur dengan mengevaluasi dampak perubahan nilai fitur terhadap akurasi model, sementara SHAP memberikan nilai yang menunjukkan pengaruh masing-masing fitur pada setiap prediksi. Dengan menggunakan teknik ini, pengguna dapat lebih memahami dan meningkatkan model yang mereka bangun.

Nilai SHAP, khususnya, dapat digunakan pada model LightGBM untuk memastikan kemampuan interpretasi prediksi dengan tingkat keterbukaan yang lebih tinggi. Dengan mengaplikasikan nilai SHAP, model dapat meningkatkan performa inferensi serta mempercepat waktu pelatihan, terutama pada *dataset* yang kompleks. Selain itu, penggunaan SHAP dapat mengurangi kecenderungan model

untuk “*fit-to-noise*” atau penyesuaian yang terlalu sensitif terhadap data acak, yang sering kali menjadi masalah dalam analisis data berukuran besar (Bugaj *et al.*, 2021). Hal ini membuat SHAP menjadi alat interpretasi yang sangat efektif dalam membangun model LightGBM yang andal dan terbuka terhadap evaluasi.

Selain PFI dan SHAP, kemampuan interpretasi dan keterbukaan dalam LightGBM dapat ditingkatkan melalui metode pembelajaran yang lebih adaptif seperti *personalized interpretability estimation* (ML-PIE). Dengan pendekatan ini, pengguna dapat mengarahkan proses sintesis model berdasarkan preferensi kemampuan interpretasi yang di personalisasi, melalui algoritma evolusi *bi-objektif* yang mempertimbangkan kemampuan interpretasi bersama dengan akurasi. Metode ML-PIE ini memungkinkan pengguna untuk menentukan prioritas interpretasi dalam pengembangan model, sehingga menghasilkan model LightGBM yang tidak hanya efisien tetapi juga mudah diinterpretasi, sesuai dengan kebutuhan spesifik dari pengguna atau lingkungan aplikasinya (Virgolin *et al.*, 2021).

Dalam pemuliaan tanaman yang memanfaatkan data genom, LightGBM terbukti menghasilkan prediksi yang lebih akurat, model yang lebih stabil, dan proses komputasi yang lebih cepat, misalnya pada data sebanyak 50.000 sampel dan 10.000 SNP (*Single Nucleotide Polymorphism*) LightGBM hanya memerlukan delapan menit pelatihan dan 20 GB memori, sementara rrBLUP (*ridge regression Best Linear Unbiased Prediction*) memakan waktu lebih dari tujuh belas jam pelatihan dan memerlukan 116 GB memori, sehingga mempercepat proses seleksi sifat unggul berbasis genomik (Yan *et al.*, 2021).

Dalam prediksi beban termal bangunan, LightGBM terbukti lebih unggul dibandingkan dengan algoritma *Random Forest* (RF) dan *Long Short-Term Memory* (LSTM) dalam hal akurasi prediksi dan efisiensi komputasi. Sebagai contoh, dalam studi oleh Chen *et al.* (2023), LightGBM mencapai nilai koefisien variasi dari *root mean squared error* (CVRMSE) sebesar 5,25 persen dan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,9959, dengan waktu komputasi hanya 7 detik. Sebaliknya, RF memiliki CVRMSE sebesar 18,54 persen,  $R^2$  sebesar 0,9482, dan waktu komputasi 44,6 detik, sedangkan LSTM menunjukkan CVRMSE sebesar 22,06 persen,  $R^2$  sebesar 0,9267, dan waktu komputasi 758,8 detik. Hasil ini menunjukkan bahwa LightGBM tidak hanya memberikan prediksi yang lebih akurat tetapi juga memerlukan waktu komputasi yang jauh lebih singkat, menjadikannya pilihan yang sangat efisien untuk aplikasi di bidang konstruksi dan manajemen energi bangunan.

## 2.7 Brier Score

Brier Score merupakan metrik evaluasi yang mengukur ketepatan dalam pemodelan prediksi, dengan cara membagi prediksi ke dalam beberapa kelompok atau “bins” berdasarkan kesamaan nilai prediksi (Foster & Hart, 2022). Metrik ini memadukan skor kalibrasi dan skor penyempurnaan (*refinement*) untuk mengukur keahlian dalam pemodelan prediktif. Dengan menggabungkan aspek kalibrasi, yang menunjukkan seberapa baik prediksi sejalan dengan hasil aktual, dan aspek penyempurnaan, yang melihat kemampuan model dalam memisahkan atau membedakan hasil yang berbeda, Brier Score memberikan gambaran komprehensif mengenai performa model dalam memberikan prediksi probabilistik.

Penggunaan *Brier Score* dalam evaluasi model probabilitas penting karena metrik ini dapat mengukur kemampuan diskriminasi dan performa prediktif secara keseluruhan. Dengan kata lain, *Brier Score* tidak hanya melihat akurasi dari prediksi probabilitas tetapi juga sejauh mana model dapat membedakan antara kejadian yang mungkin terjadi dengan yang tidak (Dimitriadis *et al.*, 2023). Hal ini membuat *Brier Score* menjadi pilihan yang baik untuk mengevaluasi performa model probabilistik, khususnya ketika diperlukan pemahaman yang lebih dalam mengenai kualitas prediksi yang bersifat probabilistik. Fungsi Brier Score ditunjukkan pada persamaan (2.5).

$$Brier\ Score = (f_t - o_t)^2 \quad (2.5)$$

*Brier Score* digunakan untuk menghitung selisih kuadrat antara nilai prediksi dan nilai aktual, sebagaimana terlihat pada persamaan (2.5). Dalam konteks ini,  $f_t$  merepresentasikan nilai probabilitas yang diprediksi untuk suatu peristiwa, sedangkan  $o_t$  adalah nilai aktual dari peristiwa tersebut (biasanya 1 jika terjadi dan 0 jika tidak terjadi). *Brier Score* memiliki rentang nilai antara 0 hingga 1, di mana nilai yang lebih rendah menunjukkan prediksi yang lebih akurat karena mendekati hasil aktual (Steyerberg *et al.*, 2010).

*Brier Score* diperkenalkan oleh Glenn W. Brier pada tahun 1950 sebagai alat untuk menilai akurasi prediksi probabilitas (Foster & Hart, 2022). Skor ini menghitung selisih antara nilai prediksi dan realisasi aktual, di mana hasil perhitungan *Brier Score* memperlihatkan seberapa dekat prediksi tersebut dengan hasil aktual menggunakan formula *mean squared error* standar.



Sejak pertama kali diperkenalkan yaitu pada evaluasi ramalan cuaca, *Brier Score* telah berkembang menjadi metode yang diakui untuk mengukur akurasi model probabilitas dalam berbagai bidang, termasuk bisnis dan aplikasi lainnya (Petropoulos *et al.*, 2022). Penerapan awalnya pada meteorologi menunjukkan bagaimana metode ini dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam terhadap ketepatan perkiraan, yang kemudian menjadikan *Brier Score* sebagai standar dalam penilaian akurasi probabilitas di berbagai disiplin ilmu.

## 2.8 Receiver Operating Characteristic Area Under Curve (ROC AUC)

*Receiver Operating Characteristic* (ROC) adalah alat statistik yang digunakan untuk menilai kinerja model klasifikasi dengan menggambarkan hubungan antara dua parameter, yaitu *True Positive Rate* (TPR) dan *False Positive Rate* (FPR). Analisis ROC dapat dilakukan dengan memanfaatkan distribusi prior dan algoritma *elicitation* untuk memilih prior yang tepat, yang selanjutnya digunakan untuk menarik inferensi mengenai AUC (*Area Under the Curve*) dan karakteristik error model (Labadi *et al.*, 2022).

ROC juga digunakan untuk mengevaluasi kinerja perangkat pengujian dan algoritma klasifikasi dalam menilai kepatuhan terhadap kriteria tertentu (Pendrill *et al.*, 2023). Dengan demikian, ROC menjadi alat yang penting untuk perbandingan dan evaluasi relatif dari berbagai sistem klasifikasi dalam konteks yang berbeda.

Kurva ROC menggambarkan kinerja model klasifikasi pada berbagai ambang batas klasifikasi dengan memplot dua parameter utama, yaitu TPR dan FPR. Salah satu kelemahan dari kurva ROC adalah kesulitan dalam

menginterpretasi kinerja model jika terdapat banyak titik keputusan, karena setiap titik mewakili *trade-off* antara TPR dan FPR, yang dapat membuat sulit untuk menentukan titik terbaik yang mencerminkan kinerja keseluruhan model (Chen *et al.*, 2023). ROC AUC mengukur luas dua dimensi di bawah kurva ROC, dimulai dari titik (0,0) hingga (1,1). Semakin tinggi nilai ROC AUC, semakin baik model dalam membedakan antara kelas positif dan negatif.

Secara matematis, AUC dari kurva ROC dihitung dengan mengintegalkan fungsi ROC. Mengingat kurva ROC memplot *True Positive Rate* (TPR) sebagai fungsi dari *False Positive Rate* (FPR), AUC dapat didefinisikan dengan persamaan integral (Fawcett, 2006) seperti pada persamaan (2.6).

$$AUC = \int_0^1 TPR(FPR), d(FPR) \quad (2.6)$$

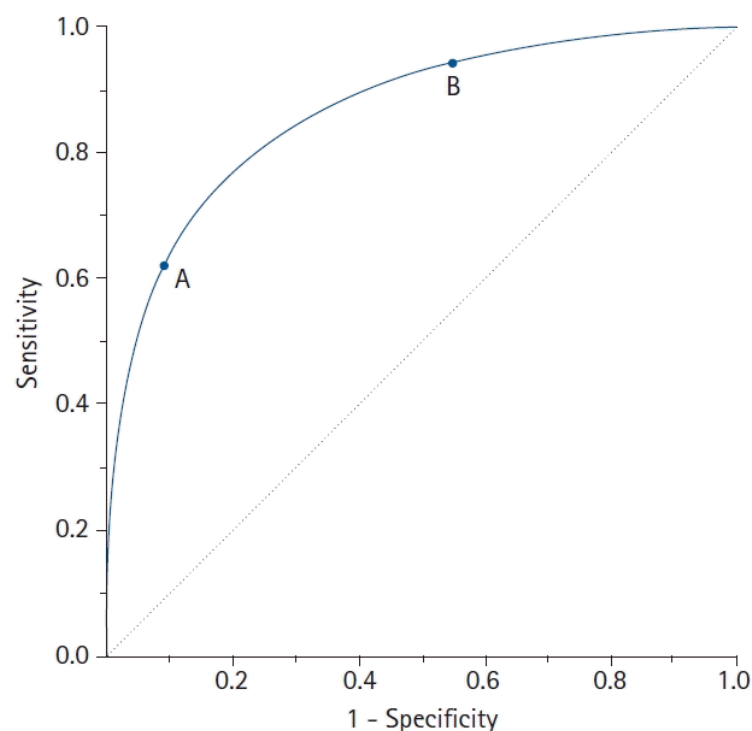
Dalam praktiknya, karena kurva ROC terdiri dari sejumlah titik diskrit, AUC sering dihitung menggunakan aturan trapesium. Parameter TPR dan FPR sendiri dihitung berdasarkan nilai dari *confusion matrix* dengan persamaan (2.7) dan (2.8).

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2.7)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (2.8)$$

Di mana TP adalah *True Positive*, FN adalah *False Negative*, FP adalah *False Positive*, dan TN adalah *True Negative*. Nilai AUC juga dapat diinterpretasikan sebagai probabilitas bahwa model akan memberikan skor yang lebih tinggi untuk sampel positif yang dipilih secara acak dibandingkan dengan sampel negatif yang dipilih secara acak (Fawcett, 2006).

Pada Gambar 2.8, menampilkan kurva ROC AUC, di mana sumbu  $x$  menunjukkan nilai  $1 - \text{spesifisitas}$  (*false positive rate*) dan sumbu  $y$  menunjukkan sensitivitas pada semua nilai *cut-off* yang diukur dari hasil pengujian (Nahm, 2022). Ketika nilai *cut-off* yang lebih ketat diterapkan, titik pada kurva akan bergerak ke bawah dan ke kiri (Titik A). Sebaliknya, saat *cut-off* lebih longgar diterapkan, titik pada kurva bergerak ke atas dan ke kanan (Titik B). Garis diagonal  $45^\circ$  pada grafik ini berfungsi sebagai garis referensi, yang merepresentasikan kurva ROC dari klasifikasi acak.



Gambar 2.8 Contoh ROC AUC (Nahm, 2022)

ROC AUC memiliki peran penting dalam evaluasi model karena mampu mengukur kinerja model dalam berbagai kelompok risiko yang diprediksi (Carrington *et al.*, 2021). Ini memberikan informasi yang lebih mendalam yang

dapat digunakan dalam pengambilan keputusan, memungkinkan pemahaman yang lebih komprehensif tentang bagaimana model berperforma di berbagai titik potong dan kelompok risiko.

Lebih lanjut, ROC AUC juga memungkinkan perbandingan yang wajar antar model dan membantu mengidentifikasi batas keputusan yang optimal serta potensi peningkatan ROC AUC. Ini membuat ROC AUC sangat bermanfaat dalam seleksi model yang lebih baik dan pemahaman tentang ruang yang dapat dioptimalkan untuk meningkatkan kinerja klasifikasi (Tafvizi *et al.*, 2022).

Secara fundamental, fungsi utama dari ROC AUC adalah untuk menyediakan satu nilai tunggal yang merangkum kinerja keseluruhan model klasifikasi di semua kemungkinan ambang batas (*threshold*). Alih-alih harus menganalisis setiap titik pada kurva ROC, yang dapat menyulitkan interpretasi jika terdapat banyak titik keputusan (Chen *et al.*, 2023), ROC AUC menyederhanakan evaluasi dengan mengukur total area dua dimensi di bawah kurva tersebut. Nilai AUC ini dapat diartikan sebagai probabilitas bahwa model akan memberikan skor prediksi yang lebih tinggi untuk sampel kelas positif yang dipilih secara acak daripada sampel kelas negatif yang dipilih secara acak. Oleh karena itu, AUC berfungsi sebagai metrik yang agregat dan tidak bergantung pada ambang batas tertentu, di mana nilai yang mendekati 1.0 menunjukkan kemampuan diskriminasi yang sangat baik antara kelas positif dan negatif, sementara nilai mendekati 0.5 mengindikasikan kinerja yang tidak lebih baik dari tebakan acak (Fawcett, 2006).

## 2.9 *Confusion Matrix*

Evaluasi kinerja sebuah model klasifikasi dimulai dari pemahaman terhadap *confusion matrix*. *Confusion matrix* adalah alat visualisasi fundamental dalam bentuk tabel kontingensi yang merangkum dan membandingkan hasil prediksi model dengan kelas aktual dari data uji. Struktur ini memberikan gambaran yang jelas tidak hanya tentang seberapa sering model benar, tetapi juga tentang jenis kesalahan yang dibuatnya (Tharwat, 2021).

Untuk masalah klasifikasi biner, *confusion matrix* biasanya disajikan dalam format 2x2. Matriks ini memiliki empat komponen utama yang mendeskripsikan hasil prediksi. Pertama, *True Positive* (TP), yang merepresentasikan kasus di mana model dengan tepat memprediksi kelas positif; sebagai contoh, sebuah email spam berhasil diidentifikasi sebagai spam. Kedua, *True Negative* (TN), yaitu kasus di mana model secara benar memprediksi kelas negatif, seperti email penting yang tidak diklasifikasikan sebagai spam. Dua komponen lainnya merepresentasikan kesalahan model. *False Positive* (FP), atau *Error Tipe I*, terjadi ketika model salah memprediksi kelas positif untuk *instance* yang sebenarnya negatif, misalnya email penting yang keliru ditandai sebagai spam. Terakhir, *False Negative* (FN), atau *Error Tipe II*, terjadi saat model salah memprediksi kelas negatif untuk *instance* yang sebenarnya positif, seperti email spam yang lolos dari filter dan masuk ke kotak masuk utama. Visualisasi dari keempat komponen tersebut disajikan dalam struktur Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Confusion Matrix

	Prediksi Positif	Prediksi Negatif
<b>Aktual Positif</b>	<i>True Positive (TP)</i>	<i>False Negative (FN)</i>
<b>Aktual Negatif</b>	<i>False Positive (FP)</i>	<i>True Negative (TN)</i>

### 2.10 Presisi (*Precision*)

Setelah memahami komponen *confusion matrix*, metrik Presisi dapat didefinisikan secara spesifik. Presisi menjawab pertanyaan: "Dari semua *instance* yang diprediksi oleh model sebagai kelas positif, berapa persen yang benar-benar positif?" Metrik ini mengukur tingkat keandalan atau ketepatan dari prediksi positif yang dibuat oleh model (Powers, 2011).

Secara matematis, presisi dihitung dengan membagi jumlah *True Positive* dengan total jumlah prediksi positif yang dihasilkan oleh model (*True Positive* ditambah *False Positive*), seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.9) (Powers, 2011).

$$\text{Presisi} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2.9)$$

Presisi menjadi metrik yang sangat krusial dalam skenario di mana biaya dari *False Positive* (FP) sangat tinggi. Sebagai contoh, dalam sistem penyaringan email, kesalahan mengklasifikasikan email penting dari atasan sebagai spam (sebuah FP) dapat menyebabkan pengguna kehilangan informasi yang sangat krusial. Dalam kasus deteksi penyakit, mendiagnosis orang sehat sebagai penderita penyakit (FP) dapat menyebabkan kecemasan, biaya pengobatan yang tidak perlu, dan tes lebih lanjut yang invasif. Oleh karena itu, model dengan presisi tinggi lebih

disukai dalam situasi-situasi tersebut karena ia cenderung tidak salah dalam melabeli sesuatu sebagai positif (Tharwat, 2021).

### 2.11 *Recall*

*Recall*, yang juga dikenal sebagai sensitivitas atau *true positive rate* (TPR), adalah metrik yang mengukur kemampuan sebuah model untuk menemukan kembali semua sampel positif yang relevan dalam sebuah *dataset*. Dengan kata lain, *recall* merepresentasikan proporsi dari kasus positif aktual yang berhasil diidentifikasi dengan benar oleh model (Powers, 2011). Esensi dari metrik ini adalah untuk mengevaluasi tingkat kelengkapan (*completeness*) dari prediksi positif yang dihasilkan.

*Recall* sangat krusial dalam domain di mana biaya dari *False Negative* sangat tinggi. Misalnya, dalam diagnosis medis, gagal mendeteksi adanya penyakit (*False Negative*) pada pasien bisa berakibat fatal. Oleh karena itu, *recall* yang tinggi lebih diutamakan dalam konteks tersebut. *Recall* dapat dihitung dengan persamaan (2.10) (Powers, 2011).

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2.10)$$

### 2.12 *F1-Score*

*F1-Score* adalah metrik yang menggabungkan presisi dan *recall* ke dalam satu skor tunggal dengan menghitung rata-rata harmonik dari keduanya. Rata-rata harmonik cenderung lebih dekat ke nilai yang lebih kecil, sehingga *F1-Score* memberikan bobot yang seimbang pada kedua metrik tersebut (Sasaki, 2007).

Metrik ini sangat berguna ketika terjadi ketidakseimbangan kelas (*imbalanced class*), di mana jumlah sampel pada satu kelas jauh lebih dominan daripada kelas lainnya. Dalam kasus seperti itu, akurasi saja bisa menyesatkan, sedangkan *F1-Score* memberikan gambaran yang lebih representatif mengenai performa model. Nilai *F1-Score* yang tinggi menunjukkan bahwa model memiliki performa yang baik dalam hal presisi maupun *recall*, menjadikannya metrik evaluasi yang komprehensif. Persamaan untuk *F1-Score* ditunjukkan pada persamaan (2.11) (Sasaki, 2007).

$$F1 - Score = 2 \times \frac{Presisi \times Recall}{Presisi + Recall} \quad (2.11)$$

### 2.13 *Log-Loss (Logarithmic Loss)*

*Log-Loss*, yang secara formal dikenal sebagai *cross-entropy loss*, merupakan metrik evaluasi fundamental yang digunakan untuk menilai performa model klasifikasi yang keluarannya bukan sekadar label kelas, melainkan sebuah nilai probabilitas antara 0 dan 1. Metrik ini berakar dari teori informasi dan secara inheren mengukur "jarak" atau perbedaan antara dua distribusi probabilitas: distribusi probabilitas prediksi yang dihasilkan oleh model dan distribusi probabilitas aktual (yang dalam kasus klasifikasi biner, probabilitasnya adalah 1 untuk kelas yang benar dan 0 untuk yang salah). Oleh karena itu, *Log-Loss* memberikan gambaran yang lebih bernuansa tentang kinerja model dibandingkan metrik yang hanya berfokus pada akurasi.

Tujuan utama penggunaan *Log-Loss* adalah untuk mengukur seberapa baik kalibrasi probabilitas yang dihasilkan oleh sebuah model. Dalam banyak aplikasi,



terutama yang melibatkan pengambilan keputusan berdasarkan risiko, mengetahui probabilitas suatu hasil jauh lebih berharga daripada sekadar prediksi biner (benar/salah). Metrik seperti akurasi hanya mengevaluasi kebenaran klasifikasi, tetapi mengabaikan seberapa "yakin" model terhadap prediksinya. *Log-Loss* mengisi celah ini dengan memberikan evaluasi yang lebih mendalam, di mana ia memperhitungkan tingkat "keyakinan" (*confidence*) dari setiap prediksi. Dengan kata lain, tujuannya adalah untuk menilai apakah nilai probabilitas yang diprediksi oleh model secara akurat dan andal merefleksikan kemungkinan sebenarnya dari suatu kejadian.

Metrik ini akan memberikan penalti yang besar ketika prediksi yang dihasilkan sangat yakin namun ternyata salah. Sebagai contoh, jika sebuah model memprediksi probabilitas 0.95 untuk suatu data yang ternyata memiliki label aktual 0 (negatif), penalti yang diterima akan signifikan. Sebaliknya, penalti akan jauh lebih kecil jika untuk kasus yang sama, model memberikan prediksi dengan keyakinan lebih rendah (misalnya probabilitas 0.55).

Dengan demikian, *Log-Loss* mendorong model untuk tidak hanya membuat prediksi yang benar, tetapi juga untuk menghasilkan probabilitas yang terkalibrasi dengan baik di seluruh rentang kemungkinan. Model yang sempurna, yang mampu memberikan probabilitas 1 untuk semua kejadian positif dan probabilitas 0 untuk semua kejadian negatif, akan memiliki nilai *Log-Loss* 0. Nilai *Log-Loss* yang semakin tinggi menunjukkan performa model yang lebih buruk.

Untuk masalah klasifikasi biner (di mana hasil akhirnya adalah 1 atau 0), *Log-Loss* dihitung menggunakan persamaan (2.13) (Bishop, 2006).

$$LogLoss = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i \log(p_i) + (1 - y_i) \log(1 - p_i)] \quad (2.13)$$

Dalam persamaan (2.13),  $N$  merepresentasikan jumlah total sampel dalam *dataset*. Perhitungan kerugian dilakukan secara iteratif untuk setiap sampel, dari sampel pertama ( $i=1$ ) hingga terakhir ( $i=N$ ), yang dilambangkan oleh operator sigma ( $\Sigma$ ). Hasil penjumlahan total kerugian kemudian dinormalisasi dengan cara dibagi oleh  $N$ , sehingga menghasilkan nilai kerugian rata-rata. Normalisasi ini memastikan bahwa performa model dapat dibandingkan secara adil tanpa terpengaruh oleh ukuran *dataset*.

Setiap komponen dalam kurung siku menghitung kerugian untuk satu sampel individual. Di sini,  $y_i$  adalah label kelas aktual dari sampel ke- $i$ , yang memiliki nilai 1 untuk kelas positif dan 0 untuk kelas negatif. Sementara itu,  $p_i$  adalah probabilitas yang dihasilkan oleh model, yang menunjukkan prediksi peluang sampel ke- $i$  untuk masuk ke dalam kelas positif (nilai antara 0 dan 1). Fungsi logaritma natural,  $\log()$ , menjadi inti dari mekanisme penalti dalam rumus ini.

Logika perhitungan kerugian dapat dipahami dengan menganalisis dua kondisi berdasarkan nilai  $y_i$ . Pertama, ketika label aktualnya adalah 1 ( $y_i=1$ ), suku kedua dalam penjumlahan, yaitu  $(1-y_i)\log(1-p_i)$ , akan menjadi nol. Dengan demikian, kerugian untuk sampel ini hanya dihitung dari suku pertama,  $y_i \log(p_i)$  atau  $\log(p_i)$ . Jika model memprediksi probabilitas ( $p_i$ ) yang mendekati 1 (sangat yakin benar), nilai  $\log(p_i)$  akan mendekati 0, yang berarti kerugian sangat kecil.

Sebaliknya, jika model salah prediksi dengan  $p_i$  mendekati 0, nilai  $\log(p_i)$  akan menuju negatif tak terhingga, yang setelah dikalikan dengan tanda negatif di awal rumus, akan menghasilkan nilai kerugian yang sangat besar.

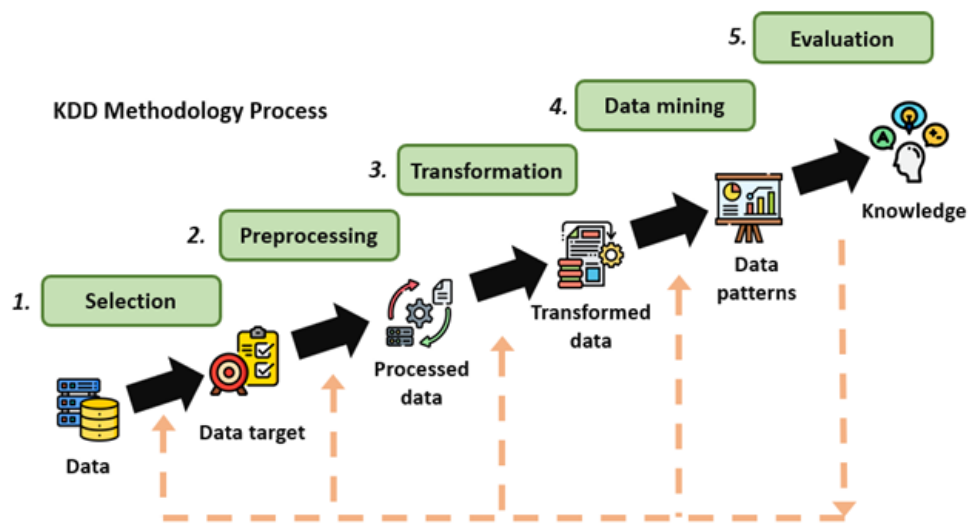
Kedua, ketika label aktualnya adalah 0 ( $y_i=0$ ), suku pertama,  $y_i \log(p_i)$ , akan menjadi nol. Perhitungan kerugian kini bergantung pada suku kedua,  $(1-y_i)\log(1-p_i)$  atau  $\log(1-p_i)$ . Suku  $1-p_i$  merepresentasikan probabilitas sampel untuk masuk ke kelas negatif. Jika model memprediksi  $p_i$  mendekati 0 (sehingga  $1-p_i$  mendekati 1), maka model sangat yakin bahwa sampel ini adalah kelas negatif. Dalam kasus ini, nilai  $\log(1-p_i)$  akan mendekati 0, dan kerugiannya pun kecil. Namun, jika model salah besar dengan memprediksi  $p_i$  mendekati 1, maka  $1-p_i$  akan mendekati 0, dan kerugian (*loss*) yang dihasilkan akan sangat besar.

#### 2.14 *Knowledge Discovery in Databases (KDD)*

*Knowledge Discovery in Databases* atau KDD adalah proses yang bertujuan untuk mengekstraksi informasi yang dapat dipahami, menarik, dan bernilai dari data yang tidak terstruktur (Solanki & Sharma, 2021). Proses ini digunakan di berbagai bidang, seperti ilmu kehidupan, perdagangan, keuangan, dan kedokteran, untuk mengidentifikasi pola-pola yang tersembunyi dalam data yang besar dan kompleks (Solanki & Sharma, 2021). Proses ini mencakup berbagai teknik dan metode yang dapat digunakan untuk menggali wawasan dari data yang belum terorganisir.

KDD merupakan suatu bidang yang mengandalkan metode cerdas dalam *data mining* untuk menemukan pola-pola yang menjadi inti pengetahuan (Atloba,

Balkir, & El-Mouadib, 2021). Pola-pola ini memungkinkan pengguna untuk memahami informasi yang terkandung dalam *dataset* besar, memberikan wawasan yang dapat diterapkan untuk pengambilan keputusan yang lebih baik dalam berbagai disiplin ilmu, dan alur prosesnya diilustrasikan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Proses KDD (Paucar & Andrade-Arenas, 2025)

Proses KDD, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.9, merupakan alur kerja sistematis yang terdiri dari beberapa tahapan penting untuk mengubah data mentah menjadi pengetahuan yang berguna (Paucar & Andrade-Arenas, 2025).

Tahapan-tahapan tersebut adalah:

- a. Seleksi (*Selection*): Tahap awal di mana *subset* data yang relevan dengan tujuan analisis dipilih dari kumpulan data yang besar. Ini melibatkan pemilihan variabel dan sampel data yang akan menjadi fokus utama dalam proses penemuan pengetahuan.

- b. Pra-pemrosesan (*Preprocessing*): Pada tahap ini, data yang telah dipilih dibersihkan untuk memastikan kualitasnya. Aktivitas yang dilakukan meliputi penanganan data yang hilang (*missing values*), penghapusan *noise* atau data yang tidak konsisten, dan perbaikan kesalahan data.
- c. Transformasi (*Transformation*): Data yang sudah bersih diubah atau dikonsolidasikan ke dalam format yang sesuai untuk proses penambangan data. Ini bisa mencakup normalisasi data, agregasi, atau pembuatan atribut baru (dikenal sebagai *feature engineering*) untuk meningkatkan efektivitas analisis.
- d. Penambangan Data (Data Mining): Ini adalah tahap inti di mana berbagai metode dan algoritma cerdas (seperti klasifikasi, *clustering*, atau analisis asosiasi) diterapkan pada data yang telah ditransformasi untuk mengidentifikasi pola-pola yang berpotensi menarik dan bermanfaat.
- e. Evaluasi dan Interpretasi (*Evaluation*): Pola-pola yang ditemukan pada tahap sebelumnya dievaluasi untuk memverifikasi validitasnya dan diinterpretasikan untuk menjadi pengetahuan. Hanya pola yang dianggap signifikan, baru, dan dapat ditindaklanjuti yang akan disajikan kepada pengguna sebagai hasil akhir.

Dalam KDD, *machine learning* berperan penting untuk menganalisis data, mengenali korelasi, dan memprediksi hasil yang akan terjadi (Kodati & Selvaraj, 2021). Teknik-teknik *machine learning* digunakan untuk melatih model dalam mengidentifikasi pola-pola yang ada dalam data, yang kemudian dapat digunakan

untuk membuat prediksi yang lebih akurat dalam berbagai aplikasi, seperti analisis kesehatan atau analisis perilaku konsumen.

Aplikasi KDD sangat luas, salah satunya adalah dalam bidang kesehatan, di mana KDD digunakan untuk mengembangkan sistem medis yang dapat mendeteksi dan memberikan saran pengobatan untuk penyakit dengan upaya minimal (Nwankwo, Ngene, & Onuora, 2023). Selain itu, KDD berbasis metode *gradient boosting machine* juga diterapkan dalam prediksi energi listrik, memberikan referensi praktis bagi aplikasi KDD pada sektor energi lainnya (Xie *et al.*, 2022).

KDD juga memiliki keterkaitan yang erat dengan analisis olahraga, khususnya sepak bola, di mana pendekatan KDD yang komprehensif memungkinkan persiapan data yang tepat untuk prediksi hasil pertandingan olahraga, termasuk hasil pertandingan sepak bola (Głowania, Kozak, & Juszczuk, 2023). Dengan menggunakan teknik KDD, analisis yang lebih mendalam dapat dilakukan terhadap data pertandingan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi hasil akhir pertandingan.

### **2.15 Feature Engineering**

*Feature engineering* adalah proses rekayasa data secara cerdas untuk meningkatkan kinerja model *machine learning* dengan cara meningkatkan akurasi dan kemampuan interpretasinya (Verdonck *et al.*, 2024). Proses ini dilakukan melalui penyesuaian fitur yang telah ada atau dengan mengekstraksi fitur baru yang lebih bermakna dari berbagai sumber data. Teknik ini bertujuan untuk menciptakan representasi data yang lebih informatif, sehingga model dapat memahami hubungan

yang lebih kompleks di dalam data. *Feature engineering* tidak hanya membantu dalam memperbaiki akurasi prediksi, tetapi juga memungkinkan pengguna untuk memahami bagaimana setiap fitur memengaruhi hasil akhir, menjadikannya langkah penting dalam pengembangan model *machine learning* yang lebih efektif dan dapat diandalkan.

*Feature engineering* memungkinkan pengguna untuk membuat fitur-fitur baru secara mandiri yang lebih relevan dengan permasalahan yang sedang dianalisis (Das *et al.*, 2022). Fitur-fitur ini kemudian dapat digunakan untuk meningkatkan proses penerapan algoritma *machine learning* dalam membuat prediksi yang lebih akurat. Dengan menciptakan fitur yang disesuaikan dengan kebutuhan analisis, pengguna dapat membantu model *machine learning* mengenali pola-pola penting yang sebelumnya tidak terdeteksi, sehingga hasil prediksi menjadi lebih optimal dan bermakna.

Teknik-teknik esensial dalam *feature engineering* berperan penting dalam meningkatkan kinerja model prediksi di berbagai bidang. Teknik-teknik ini mencakup (Katya, 2023):

a. *Feature Selection*

*Feature Selection* merupakan proses memilih fitur-fitur yang paling relevan dan informatif dari kumpulan data yang tersedia. Dengan menyaring fitur yang tidak signifikan atau *redundant*, proses ini membantu mengurangi *noise* dan kompleksitas data. Hal tersebut sangat penting untuk mencegah *overfitting* dan memastikan bahwa model hanya menggunakan informasi yang benar-benar berkontribusi terhadap variabel target. Dengan demikian,

model prediksi dapat bekerja lebih efisien dan menghasilkan akurasi yang lebih tinggi.

b. *Dimensionality Reduction*

*Dimensionality reduction* adalah teknik yang bertujuan untuk mengurangi jumlah fitur dalam *dataset* tanpa mengorbankan informasi penting yang terkandung di dalamnya. Teknik ini menyederhanakan struktur data, sehingga memudahkan proses analisis dan meningkatkan performa model. Metode seperti *Principal Component Analysis* (PCA) mengubah fitur asli menjadi komponen baru yang lebih ringkas, tetapi tetap merepresentasikan variasi data secara keseluruhan. Pendekatan ini tidak hanya mempercepat proses pelatihan model, tetapi juga meningkatkan kemampuan interpretasi hasil.

c. *Interaction Term Creation*

*Interaction term creation* adalah proses menciptakan fitur baru dengan mengombinasikan dua atau lebih fitur yang ada. Teknik ini dirancang untuk menangkap interaksi atau hubungan sinergis antar fitur yang mungkin tidak terlihat saat dianalisis secara individual. Dengan menggabungkan fitur-fitur tersebut, model dapat lebih sensitif terhadap pola-pola kompleks yang berpengaruh terhadap hasil akhir, sehingga meningkatkan keakuratan prediksi.

Secara keseluruhan, penerapan teknik-teknik ini dalam *feature engineering* membantu mengoptimalkan data input sehingga algoritma *machine learning* dapat menghasilkan prediksi yang lebih akurat dan interpretasi yang lebih mendalam.



Teknik-teknik tersebut berperan penting dalam menyederhanakan, menyoroti, dan memperkaya informasi yang terkandung dalam data, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap peningkatan kinerja model di berbagai aplikasi.

## 2.16 *Tools* Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini didukung oleh beberapa perangkat lunak esensial yang digunakan untuk pemrosesan dan analisis data. Setiap *tool* memiliki peran spesifik yang berkontribusi pada pencapaian tujuan penelitian.

### 2.16.1 Python

Python adalah bahasa pemrograman tingkat tinggi bersifat *object-oriented*, dikembangkan oleh Guido van Rossum, bahasa ini dirancang untuk menjadi mudah dipahami dan digunakan sehingga cocok baik untuk pemula yang sedang mempelajari dasar-dasar pemrograman maupun untuk para profesional yang mengerjakan proyek pemrograman di dunia nyata (Srinath, 2017). Python menawarkan *syntax* yang sederhana dan intuitif, sehingga memungkinkan pengguna menulis kode dengan lebih cepat dan efisien. Selain itu, Python memiliki dukungan pustaka yang sangat luas serta komunitas yang aktif, menjadikannya pilihan populer untuk berbagai kebutuhan, mulai dari pengembangan web, analisis data, *machine learning*, hingga komputasi ilmiah dan otomatisasi sistem.

Python menawarkan keseimbangan antara kejelasan *syntax* dan fleksibilitas dalam pengembangan alat-alat penelitian komputasi, sehingga sangat mendukung dalam menciptakan solusi untuk berbagai jenis permasalahan yang kompleks.

Bahasa ini dirancang untuk menangani beragam tantangan yang melibatkan pengolahan *dataset* berukuran besar, penerapan algoritma yang rumit, serta pengembangan sistem komputasi (Pérez, Granger & Hunter, 2011). Kemampuan Python untuk berintegrasi dengan berbagai pustaka dan *framework* membuatnya menjadi pilihan utama dalam penelitian berbasis data dan pengembangan teknologi inovatif. Dengan ekosistem yang luas, Python memungkinkan peneliti dan pengembang untuk membangun, menguji, serta mengimplementasikan solusi secara efisien dan *scalable*.

### 2.16.2 Pandas

Pandas adalah pustaka Python berperforma tinggi yang dirancang khusus untuk manipulasi, analisis, dan eksplorasi data. Pustaka ini banyak digunakan oleh peneliti data, analis, dan pengembang karena kemampuannya yang unggul dalam mengolah data secara efisien (Molin & Jee, 2021). Pandas menyediakan berbagai fungsi yang memudahkan proses pembersihan, transformasi, serta analisis data dalam berbagai format, seperti tabel, *file* CSV, dan *database*. Selain itu, Pandas juga mendukung integrasi dengan pustaka visualisasi seperti Matplotlib dan Seaborn, sehingga memungkinkan pengguna untuk membuat visualisasi data yang informatif dan menarik. Kemudahan penggunaan serta fleksibilitas Pandas menjadikannya salah satu alat utama dalam analisis data modern dan pengembangan aplikasi berbasis data.

Salah satu kekuatan utama dari pustaka ini adalah penggunaan data *frame* dan *series*, yang menjadi inti dalam proses manipulasi, perhitungan, serta analisis

data (Nelli, 2015). Data *frame* adalah struktur data berbentuk tabel dengan label pada baris dan kolom, mirip dengan tabel pada *database* atau *spreadsheet*, sehingga memudahkan pengolahan data dalam jumlah besar. Sementara itu, *series* merupakan struktur data satu dimensi yang berfungsi seperti *array*, tetapi dilengkapi dengan indeks yang memungkinkan akses data lebih fleksibel. Kombinasi dari dua struktur data ini memungkinkan pengguna untuk melakukan berbagai operasi analisis secara efisien, seperti pengolahan data numerik, transformasi data, serta agregasi hasil analisis dengan *syntax* yang sederhana namun *powerful*.

### 2.16.3 Scikit-learn

Scikit-learn merupakan pustaka Python yang menyediakan antarmuka standar untuk mengimplementasikan berbagai algoritma *machine learning*. Pustaka ini dirancang agar mudah digunakan, sehingga memudahkan pengguna dari berbagai latar belakang untuk mengembangkan model *machine learning* dengan lebih efisien. Selain mendukung algoritma untuk klasifikasi, regresi, dan *clustering*, Scikit-learn juga dilengkapi dengan berbagai fungsi penting lainnya, seperti data *preprocessing*, *resampling*, evaluasi model, serta pencarian *hyperparameter*. Fungsi-fungsi tersebut membantu memastikan bahwa proses pengolahan data, pelatihan model, hingga evaluasi dapat dilakukan secara menyeluruh dan sistematis (Bisong, 2019).

#### 2.16.4 Matplotlib

Matplotlib adalah pustaka Python yang digunakan untuk pembuatan grafik dan visualisasi data. Pustaka ini menyediakan berbagai fitur yang memungkinkan pengguna untuk membuat beragam jenis grafik dan diagram, mulai dari grafik garis (*line plot*), grafik sebar (*scatter plot*), peta panas (*heatmap*), diagram batang (*bar chart*), diagram lingkaran (*pie chart*), hingga visualisasi data dalam bentuk tiga dimensi (3D plot) (Hunt, 2019). Kemampuan Matplotlib dalam menghasilkan visualisasi yang informatif dan berkualitas tinggi menjadikannya salah satu alat utama bagi peneliti dan analis data. Selain itu, pustaka ini mendukung kustomisasi penuh pada setiap elemen grafik, seperti warna, label, dan sumbu, sehingga memudahkan pengguna untuk menyajikan data secara lebih menarik dan sesuai dengan kebutuhan analisis.

#### 2.16.5 Seaborn

Seaborn adalah pustaka Python yang dirancang untuk membuat visualisasi grafik statistik dengan cara yang lebih mudah dan estetik. Pustaka ini menyediakan antarmuka tingkat tinggi untuk Matplotlib, sehingga memungkinkan pengguna membuat grafik kompleks dengan sedikit kode (Waskom, 2021). Seaborn juga terintegrasi erat dengan Pandas, sehingga pengguna dapat langsung memvisualisasikan data dari struktur data *frame* tanpa perlu konversi tambahan. Dengan berbagai fitur bawaan, seperti pembuatan grafik hubungan antar variabel, distribusi data, serta anotasi statistik, Seaborn membantu dalam menyajikan visualisasi data yang informatif dan menarik. Kemudahan penggunaan serta desain

visual yang lebih elegan membuat Seaborn menjadi pilihan utama bagi analis data dan ilmuwan data yang ingin meningkatkan kualitas visualisasi mereka.

### **2.17 Penelitian Sejenis**

Penelitian sejenis yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Penelitian Sejenis

Penulis	Domain Riset	Metode dan <i>Tools</i>	<i>Dataset</i> (Populasi, Sampel)	Kontribusi	Hasil
Pollard & Reep (1997)	Pemodelan Kualitas Tembakan dan Cikal Bakal Metrik xG	Regresi Logistik	22 pertandingan, 489 tembakan	Salah satu studi perintis dalam kuantifikasi xG, membuktikan pentingnya lokasi tembakan.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Persamaan probabilitas gol (regresi logistik)</li> <li>• Koefisien Jarak (X): -0.096 (semakin jauh, peluang turun)</li> <li>• Koefisien Sudut (A): -1.037 (semakin menyamping, peluang turun)</li> </ul>
Ensum, Pollard, & Taylor (2005)	Pengembangan Model Probabilitas Gol Melalui Analisis Multivariat Kontekstual	Regresi Logistik	48 pertandingan, 1.099 tembakan ( <i>FA Premier League &amp; World Cup</i> )	Konfirmasi dan perluasan temuan awal dengan <i>dataset</i> yang lebih besar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Persamaan probabilitas gol (regresi logistik)</li> <li>• Koefisien Jarak: -0.16</li> <li>• Koefisien Sudut: -1.24</li> <li>• Koefisien Sundulan: -0.73</li> <li>• Koefisien Kaki Lemah: -0.63</li> <li>• Koefisien Tendangan Voli: -0.27 (Semua</li> </ul>

Penulis	Domain Riset	Metode dan Tools	Dataset (Populasi, Sampel)	Kontribusi	Hasil
					koefisien negatif menunjukkan penurunan probabilitas gol dibandingkan kondisi ideal).
Lucey <i>et al.</i> (2015)	Analitika Video <i>Spasiotemporal</i> untuk Pemodelan Peluang Gol	<i>Conditional Random Fields</i>	Data Prozone/Stats Perform (~9.732 tembakan + 10 detik video pra-tembakan)	Menggabungkan fitur strategis & <i>spasiotemporal</i> (fase permainan, interaksi pemain) dari data video.	ROC AUC: <ul style="list-style-type: none"> <li>• AUC Model <i>Baseline</i> (Hanya Lokasi): 0.75</li> <li>• AUC Model <i>Spasiotemporal</i> (EGV): 0.81</li> </ul>
Ruiz <i>et al.</i> (2015)	<i>Machine Learning</i> untuk Evaluasi Kemampuan <i>Finishing</i> Pemain	<i>Multilayer Perceptron</i> (MLP)	Data Prozone (EPL 2013/14, 10.318 tembakan)	Aplikasi model non-linear (MLP) untuk mengidentifikasi efisiensi pemain secara individual.	<i>p-value</i> : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tingkat Signifikansi Sangat Tinggi (p 0.01):            - Sergio Agüero            - Wayne Rooney            - Luis Suárez</li> <li>• Tingkat Signifikansi Tinggi (p 0.05)            - Daniel Sturridge            - Yaya Touré</li> </ul>

Penulis	Domain Riset	Metode dan <i>Tools</i>	<i>Dataset</i> (Populasi, Sampel)	Kontribusi	Hasil
					Nilai <i>p-value</i> ini menunjukkan bahwa kemampuan individu para pemain ini dalam mencetak gol secara signifikan melebihi ekspektasi model xG standar.
Eggels <i>et al.</i> (2016)	Analitik Prediktif untuk Hasil Pertandingan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regresi Logistik</li> <li>• <i>Decision Tree</i></li> <li>• <i>Random Forest</i></li> <li>• AdaBoost</li> <li>• Python (scikit-learn)</li> </ul>	Data <i>event/tracking</i> ORTEC & Inmotio + atribut EA Sports (~20.000 tembakan)	Perbandingan komprehensif berbagai model <i>machine learning</i> untuk prediksi xG.	ROC AUC: AdaBoost = 0,84 <i>Random Forest</i> = 0,82 Regresi Logistik = 0,78 <i>Decision Tree</i> = 0,74
Fairchild <i>et al.</i> (2018)	Analitika Terapan Pemodelan xG yang Praktis dan Terinterpretasi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regresi Logistik</li> <li>• Python</li> <li>• SciPy/Statsmodels</li> </ul>	1.115 tembakan non-penalti dari 99 pertandingan MLS 2016 (data <i>tag manual</i> )	Aplikasi model sederhana yang dapat diinterpretasikan pada <i>dataset</i> yang lebih kecil	Kalibrasi model yang kuat dengan validasi silang ROC AUC = 0,80.
P. M. Pardo (2020)	Pengayaan Model xG dengan Atribut Pemain dari Data Eksternal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regresi Logistik</li> <li>• XGBoost</li> <li>• ANN</li> <li>• <i>scikit-learn</i></li> </ul>	Data OPTA (~20.000 tembakan) + atribut	<b>Integrasi atribut kualitatif pemain (dari <i>game</i> FIFA) ke dalam model xG.</b>	<b>ROC AUC:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ANN = 0,88</li> <li>• XGBoost = 0,85</li> <li>• Regresi Logistik = 0,78.</li> </ul>



Penulis	Domain Riset	Metode dan <i>Tools</i>	<i>Dataset</i> (Populasi, Sampel)	Kontribusi	Hasil
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Keras</li> </ul>	pemain FIFA (740 pemain)		<b>RMSE:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>ANN = 0,25</li> <li>XGBoost = 0,27</li> <li>Regresi Logistik = 0,32.</li> </ul>
Wheatcroft & Sienkiewicz (2021)	Pemodelan Probabilistik Kesuksesan Tembakan	<ul style="list-style-type: none"> <li>Model probabilistik parametrik</li> <li>Python (SciPy <i>optimize</i>)</li> </ul>	>1 juta tembakan dari 22 liga (football-data.co.uk)	Pengembangan model yang sangat sederhana dan cepat untuk <i>pipeline</i> prediksi.	Peningkatan <i>Log-Score</i> ( <i>log-likelihood per shot</i> ) dibandingkan model dasar: <ul style="list-style-type: none"> <li><i>Log-Score</i> Model Mereka: -0.312</li> <li><i>Log-Score Baseline Naive</i>: -0.342</li> <li>Peningkatan vs. <i>Baseline Naive</i>: +0.030</li> <li>Peningkatan vs. <i>Baseline Pollard &amp; Reep</i>: +0.004</li> </ul>
Cavus & Biecek (2022)	<i>Explainable AI</i> (XAI) untuk Interpretabilitas	XGBoost, RF, LightGBM, CatBoost (via AutoML)	Data <i>event</i> Understat (315.430 tembakan)	Pionir dalam menerapkan AutoML untuk eksplorasi model dan SHAP untuk	<i>Random Forest</i> menjadi model terbaik: <ul style="list-style-type: none"> <li>ROC AUC (<i>Random Forest</i>): 0.875</li> </ul>

Penulis	Domain Riset	Metode dan <i>Tools</i>	<i>Dataset</i> (Populasi, Sampel)	Kontribusi	Hasil
	Model xG  Kompleks			interpretabilitas model kompleks.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brier Score (<i>Random Forest</i>): 0.072</li> </ul> Performa model lain: <ul style="list-style-type: none"> <li>• AUC (LightGBM): 0.873</li> <li>• AUC (CatBoost): 0.872</li> <li>• AUC (XGBoost): 0.869</li> </ul>
Méndez <i>et al.</i> (2023)	Peningkatan Nilai xG dengan Jaringan Saraf	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Multilayer Perceptron</i> (MLP)</li> <li>• Python</li> <li>• Keras</li> </ul>	Data event StatsBomb (>12.000 tembakan)	Menunjukkan superioritas MLP dalam menangkap pola non-linear dibandingkan regresi logistik.	MLP secara konsisten mengungguli Regresi Logistik (LR) di semua metrik: <ul style="list-style-type: none"> <li>• ROC AUC: 0.87 (MLP) vs. 0.82 (LR)</li> <li>• Akurasi: 90.04% (MLP) vs. 89.28% (LR)</li> <li>• Brier Score: 0.076 (MLP) vs. 0.081 (LR)</li> </ul>

Penulis	Domain Riset	Metode dan <i>Tools</i>	<i>Dataset</i> (Populasi, Sampel)	Kontribusi	Hasil
					<ul style="list-style-type: none"> <li>• Log-Loss: 0.262 (MLP) vs. 0.280 (LR)</li> <li>• F1-Score: 0.41 (MLP) vs. 0.34 (LR)</li> </ul> <p>Arsitektur MLP: 2 <i>hidden layers</i> (16 dan 8 neuron, aktivasi <i>ReLU</i>)</p>
Mead <i>et al.</i> (2023)	Peningkatan Performa & Demonstrasi Nilai Model xG	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regresi Logistik,</li> <li>• RF,</li> <li>• AdaBoost,</li> <li>• XGBoost,</li> <li>• Python (scikit-learn)</li> </ul>	Data Wyscout (~250.000 tembakan)	Menunjukkan peningkatan performa signifikan dengan fitur tambahan (nilai pemain, <i>rating</i> ELO).	<p>Perbandingan ROC AUC yang menunjukkan keunggulan <i>Random Forest</i> dengan fitur yang diperkaya:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Random Forest</i> (Fitur Diperkaya): 0.910</li> </ul>

Penulis	Domain Riset	Metode dan <i>Tools</i>	<i>Dataset</i> (Populasi, Sampel)	Kontribusi	Hasil
					<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Random Forest</i> (Fitur Dasar): 0.891</li> <li>• Regresi Logistik (Fitur Dasar): 0.852</li> </ul>
Hewitt & Karakuş (2023)	Pemodelan xG Kontekstual Berbasis Identitas dan Peran Pemain	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Regresi Logistik</i>,</li> <li>• <i>Gradient Boosted Trees (GBT)</i>,</li> <li>• <i>scikit-learn</i>,</li> </ul>	Data <i>event</i> StatsBomb (15.574 tembakan) dari 5 liga top Eropa musim 2021/22	Mengembangkan model yang menyesuaikan nilai xG dengan kemampuan pemain dan posisi.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Korelasi Pearson antara xG dan gol lebih tinggi pada GBT (0,208) dibandingkan Regresi Logistik (0,188).</li> <li>• Analisis pada 347 tembakan Lionel Messi menunjukkan model ini memberikan nilai xG +3,74 lebih tinggi daripada model dasar.</li> </ul>

Penulis	Domain Riset	Metode dan Tools	Dataset (Populasi, Sampel)	Kontribusi	Hasil
Bandara <i>et al.</i> (2024)	Pemodelan xG Sekuensial Berbasis Aliran Event Pra-Tembakan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Random Forest</i> (100 <i>estimators</i>),</li> <li>• scikit-learn</li> </ul>	Data dari 990 pertandingan (StatsBomb Open Data), mencakup kompetisi seperti Piala Dunia, Euro, Liga <i>Champions</i> , dll.	Inovasi dengan menggunakan fitur dari 3 urutan <i>event</i> sebelum tembakan, bukan hanya data tembakan tunggal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Model berbasis sekuens mencapai ROC AUC 0,833 pada set validasi.</li> <li>• Pada pengujian dengan data Euro 2020, model mencapai ROC AUC 0,826, mengungguli model tembakan tunggal (<i>baseline</i>).</li> </ul>
Cefis & Carpita (2024)	Pemodelan Statistik xG dengan Pengayaan Fitur Multi-Sumber	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regresi Logistik</li> <li>• R (fungsi glm)</li> </ul>	Data dari 3 sumber: Understat, SoFIFA, Math&Sport. Total 49.872 tembakan dari 5 liga top Eropa musim 2022/23.	Mengintegrasikan fitur-fitur baru seperti tekanan pada penembak, <i>rating</i> pemain (SoFIFA), dan kekuatan lawan ke dalam model linier (Regresi Logistik).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ROC AUC = 0,812</li> <li>• <i>Brier Score</i> = 0,078</li> </ul> <p>Hasil ini menunjukkan bahwa model linier yang lebih sederhana masih bisa mencapai performa yang kuat jika diperkaya dengan</p>

Penulis	Domain Riset	Metode dan <i>Tools</i>	<i>Dataset</i> (Populasi, Sampel)	Kontribusi	Hasil
					fitur-fitur yang relevan dan inovatif.
Xu <i>et al.</i> (2025)	<i>Computer Vision</i> dan Pemodelan xG Berbasis Analisis Pose Tubuh	<ul style="list-style-type: none"> <li>Jaringan Saraf Konvolusional (CNN)</li> <li>Regresi Logistik</li> <li>Analisis <i>Pose</i> (OpenPose)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Data Publik: 477 tembakan dari <i>dataset</i> publik.</li> <li>Data SoccerNet-v2: 927 tembakan dari 500 pertandingan.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pionir dalam menggunakan data pose/kerangka tubuh pemain (<i>skeleton data</i>) secara langsung untuk estimasi xG.</li> <li>Memperkenalkan model Skor-xG yang mengintegrasikan orientasi tubuh pemain dan posisi kiper.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ROC AUC: Model Skor-xG mencapai 0,845, mengungguli model Regresi Logistik (0,791).</li> <li>Brier Score: Skor-xG mendapatkan 0,068, lebih baik dari Regresi Logistik (0,075). (Nilai lebih rendah lebih baik).</li> </ul>

Berdasarkan Tabel 2.2, terdapat lima belas penelitian yang mengkaji perhitungan metrik *Expected Goals* (xG) dalam analisis sepak bola. Penelitian-penelitian ini dapat dikelompokkan berdasarkan metodologi yang digunakan, mulai dari model statistik sederhana hingga pendekatan *deep learning* yang kompleks.

Kelompok pertama mencakup penelitian yang mengandalkan model statistik yang lebih mudah diinterpretasi. Studi perintis oleh Pollard & Reep (1997) dan kelanjutannya oleh Ensum, Pollard, & Taylor (2005) menerapkan Regresi Logistik untuk mengukur efektivitas tembakan. Pendekatan serupa juga digunakan oleh Fairchild *et al.* (2018) untuk analisis spasial di liga MLS, serta Cefis & Carpita (2024) yang memperkaya model Regresi Logistik dengan fitur inovatif seperti tekanan pada penembak dan kekuatan lawan. Selain itu, terdapat pendekatan model probabilistik parametrik yang efisien seperti yang ditunjukkan oleh Wheatcroft & Sienkiewicz (2021).

Sebagai alternatif, banyak penelitian memanfaatkan *machine learning* untuk menangkap pola non-linear yang lebih kompleks. Beberapa di antaranya berfokus pada perbandingan komprehensif berbagai algoritma. Contohnya, Eggels *et al.* (2016) menguji empat model berbeda dan menemukan AdaBoost memiliki performa terbaik, sementara Cavus & Biecek (2022) menggunakan AutoML yang menobatkan *Random Forest* sebagai model paling optimal. Mead *et al.* (2023) juga mengonfirmasi keunggulan *Random Forest*, terutama setelah diperkaya dengan fitur tambahan seperti nilai pemain dan rating ELO.

Model jaringan saraf juga menjadi pilihan populer. Ruiz *et al.* (2015) dan Méndez *et al.* (2023) secara efektif menggunakan *Multilayer Perceptron* (MLP)

untuk menunjukkan superioritas model non-linear dalam menangkap pola kompleks dibandingkan regresi logistik. Pardo (2020) turut membandingkan *Artificial Neural Network* (ANN) dengan XGBoost untuk menganalisis pengaruh informasi kualitatif pemain terhadap kualitas peluang.

Lebih lanjut, terdapat penelitian yang mengembangkan model dengan fitur-fitur yang lebih canggih dan kontekstual. Lucey *et al.* (2015) menerapkan *Conditional Random Fields* untuk memasukkan informasi spasiotemporal, sementara Bandara *et al.* (2024) menggunakan *Random Forest* dengan fitur sekuensial dari tiga kejadian terakhir sebelum tembakan. Hewitt & Karakuş (2023) mengembangkan model *Gradient Boosted Trees* yang dapat menyesuaikan nilai xG dengan kemampuan individu pemain. Inovasi paling mutakhir datang dari Xu *et al.* (2025) yang memelopori penggunaan data pose tubuh pemain (*skeleton data*) dengan *Convolutional Neural Network* (CNN) untuk menghasilkan estimasi xG yang lebih akurat.

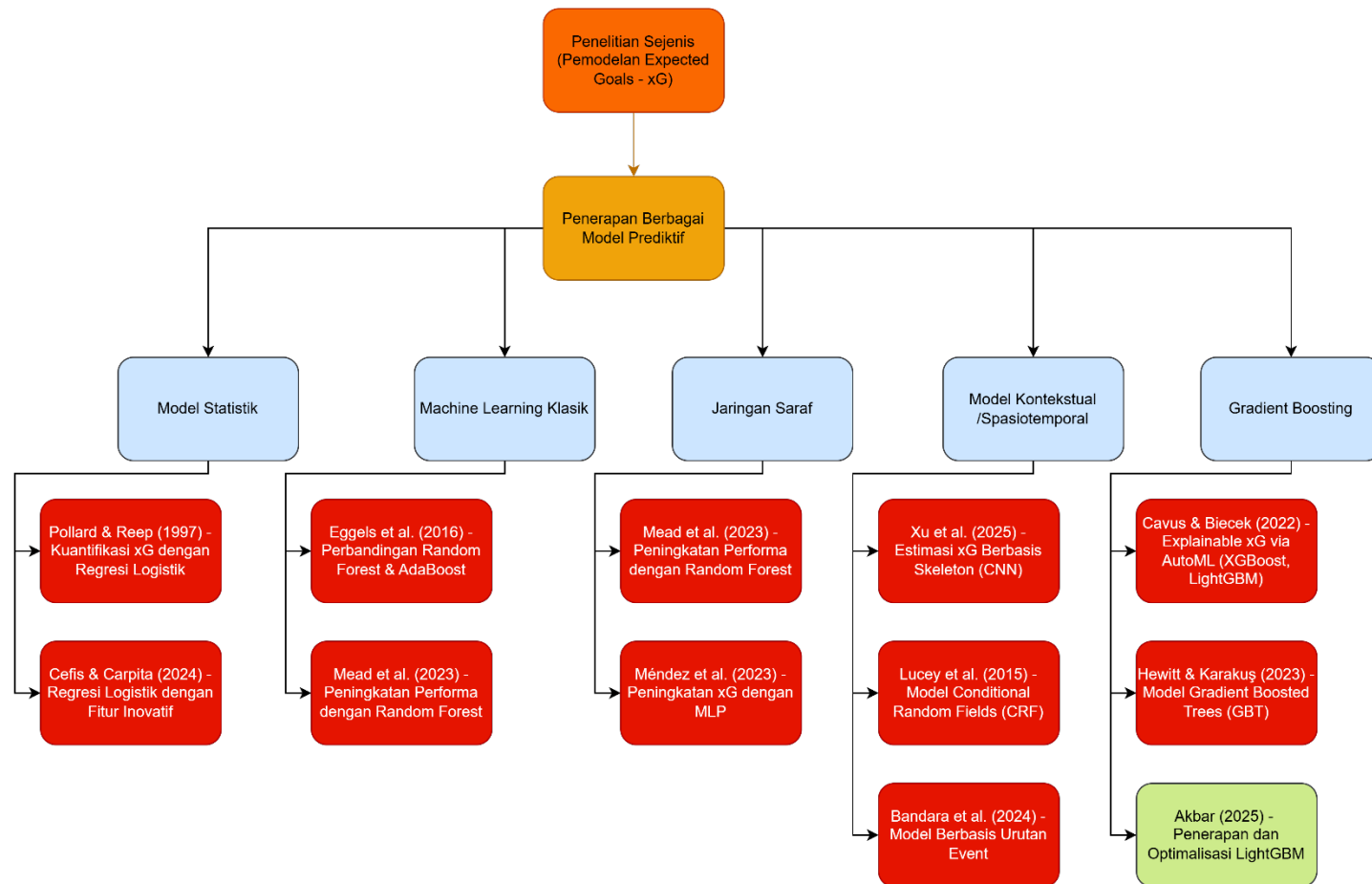
Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan LightGBM untuk perhitungan metrik xG dalam analisis sepak bola. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya di antaranya yaitu:

1. Fokus pada penggunaan LightGBM sebagai metode utama untuk perhitungan xG, yang dikenal karena efisiensi dan kecepatan komputasinya.
2. Mengeksplorasi kemampuan LightGBM dalam menangani data sepak bola, yang sering kali memiliki interaksi fitur kompleks dan non-linear, dibandingkan dengan metode yang lebih sederhana seperti regresi logistik.



### **2.18 Ranah Penelitian**

Pada tahap ini, menggambarkan ranah penelitian sejenis yang dilakukan penulis berdasarkan literatur yang dibandingkan, dimana berbagai metode mulai dari statistik hingga *machine learning* digunakan pada bidang Analisis Olahraga. Berdasarkan penelitian sejenis yang identik dengan ranah penelitian sebelumnya, maka ranah penelitian penulis berkaitan dengan bidang Analisis Sepak Bola. Gambar 2.10 adalah ilustrasi dari ranah penelitian.



Gambar 2.10 Ranah Penelitian

Ranah pada penelitian ini adalah berfokus pada penerapan dan optimalisasi algoritma LightGBM untuk prediksi nilai xG. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data *event* pertandingan sepak bola yang bersumber dari StatsBomb *Open Data*, yang mencakup berbagai kompetisi ternama di dunia. Hal yang membedakan penelitian ini dengan penelitian-penelitian sebelumnya adalah fokusnya yang mendalam pada optimalisasi algoritma LightGBM. Jika penelitian sebelumnya hanya menyertakan LightGBM sebagai salah satu pembanding dalam kerangka kerja AutoML, penelitian ini secara spesifik melakukan proses *hyperparameter tuning* dan kalibrasi untuk menggali potensi akurasi dan efisiensi komputasi yang sesungguhnya dari model. Selain itu, evaluasi model dilakukan secara komprehensif menggunakan serangkaian metrik holistik untuk memberikan gambaran kinerja yang utuh.

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Pendekatan Penelitian**

Penelitian ini menginvestigasi kinerja metode LightGBM dalam memprediksi nilai xG dari data tembakan pada pertandingan sepak bola dengan menggunakan pendekatan kuantitatif. Penelitian ini menggunakan bahasa pemrograman Python dan platform Google Colaboratory untuk proses pengambilan, pembersihan, dan pemodelan data. *Dataset* diambil dari repositori terbuka StatsBomb yang tersedia di GitHub. Microsoft Word digunakan untuk penyusunan laporan penelitian.

#### **3.2 Populasi dan Sampel atau *Dataset***

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan memanfaatkan data sekunder yang bersifat publik (*publicly available*). Oleh karena itu, dalam konteks penelitian ini, tidak ada populasi dan sampel yang merujuk pada responden manusia. Sebaliknya, populasi merujuk pada keseluruhan data peristiwa (*event data*) yang tersedia, dan sampel adalah *subset* data yang dipilih secara purposif untuk membangun dan mengevaluasi model prediksi xG.

##### **3.2.1 Sumber Data**

Data yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari StatsBomb *Open Data*. StatsBomb secara resmi menyediakan sebagian datanya secara gratis untuk

publik melalui repositori GitHub dengan tujuan mendorong riset dan inovasi di bidang analisis sepak bola. *Dataset* ini telah digunakan secara luas dalam berbagai penelitian akademik dan analisis profesional, menjadikannya sumber yang kredibel dan relevan untuk penelitian ini. Data mentah disediakan dalam format JSON (*JavaScript Object Notation*), yang berisi catatan rinci untuk setiap peristiwa yang terjadi dalam sebuah pertandingan.

### **3.2.2 Populasi Data**

Populasi data dalam penelitian ini adalah keseluruhan data peristiwa (*event data*) pertandingan sepak bola yang tersedia dalam repositori StatsBomb *Open Data*. Populasi ini mencakup ribuan pertandingan dari berbagai kompetisi elit di seluruh dunia, di antaranya:

- a. Liga-liga top Eropa (Contoh: La Liga, Serie A, Bundesliga).
- b. Kompetisi antar klub Eropa (Contoh: UEFA Champions League).
- c. Turnamen internasional (Contoh: FIFA World Cup, UEFA Euro).

Setiap pertandingan dalam populasi ini terdiri dari ribuan baris data peristiwa, seperti umpan, dribel, tekel, dan tembakan, beserta atribut-atribut kontekstual yang menyertainya.

### **3.2.3 Sampel dan Kriteria Seleksi *Dataset***

Sampel penelitian diambil dari populasi data menggunakan metode *purposive sampling* (pengambilan sampel bertujuan), di mana hanya data yang

relevan dengan tujuan pemodelan xG yang dipilih. Proses seleksi ini menghasilkan dataset akhir yang akan digunakan untuk melatih dan menguji model LightGBM.

Kriteria seleksi yang diterapkan adalah sebagai berikut:

- a. Jenis Peristiwa (*Event Type*): Hanya peristiwa dengan jenis ‘*Shot*’ (Tembakan) yang dimasukkan ke dalam *dataset*. Peristiwa lain seperti umpan, tekel, atau dribel akan diekstraksi untuk menghasilkan fitur turunan namun tidak menjadi bagian dari sampel utama.
- b. Situasi Permainan (*Play Pattern*): Sampel dibatasi hanya pada tembakan yang terjadi dari situasi permainan terbuka (*Open Play*). Tembakan yang berasal dari situasi bola mati seperti tendangan penalti (*Penalty*), tendangan bebas langsung (*Direct Free-kick*), atau situasi setelah sepak pojok (*Corner*) tidak diikutsertakan. Hal ini dilakukan untuk menjaga homogenitas data, karena probabilitas gol dari situasi bola mati memiliki karakteristik yang sangat berbeda dan sering dimodelkan secara terpisah.

Setelah melalui proses seleksi ini, terkumpul puluhan ribu data tembakan yang menjadi sampel final penelitian, yang kemudian dibagi menjadi data latih (*training data*) dan data uji (*testing data*) untuk keperluan pemodelan.

### **3.3 Perangkat Penelitian**

Penelitian ini menggunakan perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) dengan spesifikasi yang dijelaskan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi *Hardware* dan *Software*

<i>Hardware</i>	Laptop Lenovo ADA 11	AMD Athlon Gold 3150U <i>with</i> Radeon Graphics 2.40 GHz
		12.0 GB RAM
		256 GB SSD
		Monitor 15 Inch
<i>Software</i>	Sistem Operasi	Windows 11 Home
	<i>Tools</i>	Google Colaboratory
	Bahasa Pemrograman	Python

### 3.4 Pengumpulan Data

#### 3.4.1 Studi Literatur

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan sekunder. Data primer diperoleh dari *dataset* terbuka yang disediakan oleh StatsBomb melalui repositori GitHub. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari berbagai jurnal ilmiah, buku, dan sumber internet yang relevan dengan topik penelitian, khususnya yang berkaitan dengan analisis xG, pemodelan prediktif, dan algoritma LightGBM.

#### 3.4.2 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan mengunduh *dataset* event pertandingan sepak bola dari repositori *open-source* StatsBomb di GitHub. Proses ini dilakukan

menggunakan skrip Python di platform Google Colaboratory. *Dataset* yang digunakan mencakup data tembakan dalam pertandingan, termasuk informasi seperti lokasi, jarak, sudut tembakan, serta atribut kontekstual lainnya yang mendukung perhitungan nilai xG.

### 3.5 Pengembangan Model

#### 3.5.1 Metode KDD

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Knowledge Discovery in Databases* (KDD) dalam proses pengembangan model. Metode KDD memiliki keunggulan dalam membantu mengidentifikasi pola tersembunyi dari kumpulan data yang kompleks sehingga dapat menghasilkan informasi yang lebih mudah dipahami. Proses KDD terdiri dari beberapa tahapan, yaitu: *preprocessing* data, pemilihan data (*data selection*), transformasi data, proses data *mining*, dan evaluasi pengetahuan yang diperoleh (*knowledge evaluation*) (Ramos *et al.*, 2021).

##### a. *Data Selection*

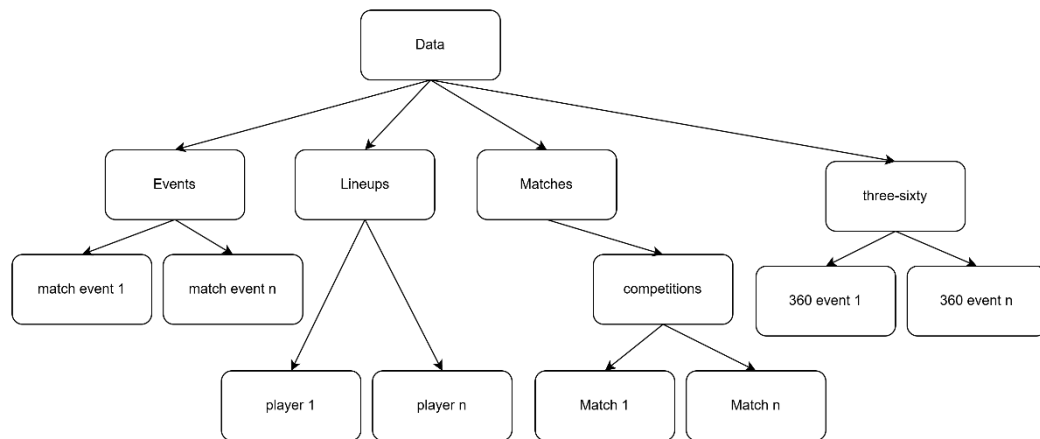
Data dari StatsBomb *open-data* diambil dengan mengakses repositori resmi di GitHub. Pertama, kita perlu mengidentifikasi kompetisi apa saja yang tersedia dalam *dataset*. Setiap kompetisi kemudian terdiri dari beberapa musim (edisi), dan masing-masing musim ini mewakili rentang waktu berlangsungnya pertandingan yang terdokumentasi. Di dalam setiap musim terdapat fase-fase pertandingan: untuk kompetisi sistem gugur biasanya meliputi babak perempat final, semi final, final, dan seterusnya, sedangkan untuk liga reguler umumnya hanya ada satu fase liga utama, dengan beberapa kompetisi seperti, Piala FA



yang juga memiliki babak *play-off*. Setelah fase-fase ditentukan, barulah kita mengakses data pertandingan. Dalam konteks StatsBomb, satu pertandingan terdiri dari serangkaian *event*, dan masing-masing *event* ini dapat memiliki *event* terkait.

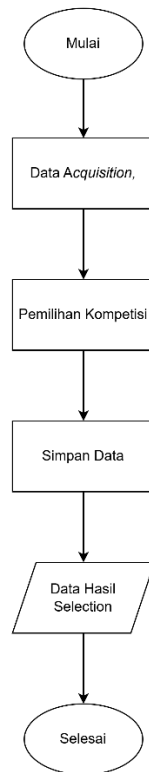
Misalnya, sebuah tusukan (*dribble*) bisa jadi dipicu oleh operan rekan tim yang sebelumnya dieksekusi operan tersebut, kemudian tercatat sebagai *event* terkait. Namun, karena operan juga tercatat sebagai *event* utama, jika kita menarik semua *event* terkait tanpa seleksi, kita akan mendapati banyak duplikasi operan tercatat dua kali, sekali sebagai *event* utama dan sekali lagi sebagai *event* terkait. Sebaliknya, jika kita sama sekali mengabaikan *event* terkait, kita bisa kehilangan jejak kronologi aksi yang sebenarnya terjadi di lapangan.

Untuk mengatasi masalah ini, saat ini hanya situasi gol dan kartu (kuning/merah) yang diikuti sebagai *event* terkait dalam pemrosesan data StatsBomb. Dengan begitu, kita tetap menjaga konteks penting seperti *assist* sebelum gol atau pelanggaran yang berujung kartu tanpa menumpuk terlalu banyak duplikasi. Pada Gambar 3.1 dijelaskan struktur data yang dimiliki oleh StatsBomb *open-data*.



Gambar 3.1 Struktur Data StatsBomb *open-data*.

Data *event* dari StatsBomb disediakan dalam format JSON pada repositori GitHub mereka. Karena pengambilan data langsung dari GitHub juga memakan waktu, biasanya *file* JSON tersebut diunduh sekali saja lalu dikonversi dan disimpan dalam format *Parquet* untuk penggunaan selanjutnya. Dengan cara ini, analisis bisa dilakukan lebih cepat tanpa perlu terus-menerus mengunduh data mentah. Gambar 3.2 menunjukkan *flowchart* dari *data selection*.



Gambar 3.2 *Flowchart Selection*

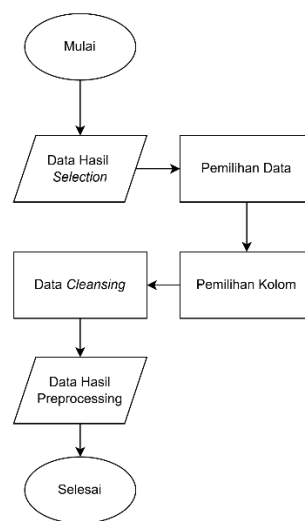
b. *Data Preprocessing*

Tahap data *preprocessing* bertujuan untuk menyiapkan data hasil seleksi agar dapat dianalisis secara optimal dan digunakan dalam proses pelatihan model. Proses ini disesuaikan dengan karakteristik data *event* sepak bola yang diperoleh dari StatsBomb, yang memiliki struktur sangat baik dan konsisten sehingga mempermudah proses pembersihan dan pengolahan data.

Langkah pertama adalah pemilihan data, yaitu dengan mengambil hanya *event* yang bertipe *Shot* dan berasal dari situasi permainan terbuka (*open play*), karena jenis tembakan ini paling relevan dalam konteks prediksi *expected goals*. Setelah itu, dilakukan pemilihan kolom dengan memilih fitur-fitur yang

berpotensi mendukung prediksi, seperti posisi tembakan, bagian tubuh yang digunakan, tekanan lawan, serta pola permainan. Kolom-kolom yang bersifat administratif atau tidak relevan terhadap tujuan model, seperti nama pemain dan identifikasi pertandingan, tidak disertakan.

Langkah terakhir adalah data *cleansing*, yang meliputi pemeriksaan nilai kosong dan duplikat. Namun, karena data StatsBomb memiliki format yang sangat terstruktur dan tiap peristiwa dalam pertandingan bersifat unik, data yang diperoleh relatif bersih dan tidak memerlukan proses pembersihan lanjutan. Tahapan *preprocessing* ini menghasilkan *dataset* yang konsisten, bebas duplikasi, dan siap untuk dianalisis lebih lanjut pada tahap transformasi dan pemodelan. Pada Gambar 3.2 dijelaskan *flowchart* dari tahap *preprocessing*.

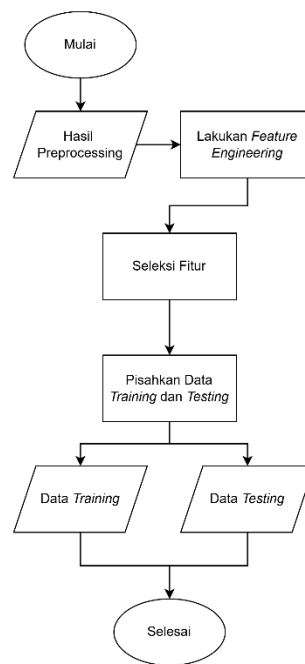


Gambar 3.3 *Flowchart Preprocessing*

### c. *Data Transformation*

Tahap ini bertujuan untuk memperkaya representasi data agar dapat meningkatkan performa model pada tahapan *data mining*. Pertama, dilakukan

proses *feature engineering* untuk menciptakan fitur-fitur baru yang merepresentasikan dinamika permainan secara lebih mendalam. Transformasi ini memungkinkan data mentah memberikan wawasan yang lebih bermakna dan relevan dalam konteks prediksi performa tembakan. Fitur-fitur seperti jarak dan sudut tembakan ke gawang serta segmentasi waktu pertandingan ditambahkan untuk memperkaya informasi spasial dan temporal. Setelah fitur baru ditambahkan, data kemudian dibagi menjadi data latih dan data uji agar proses pelatihan dan evaluasi model dapat dilakukan secara terpisah. Alur tahapan *transformation* ditunjukkan pada Gambar 3.3.

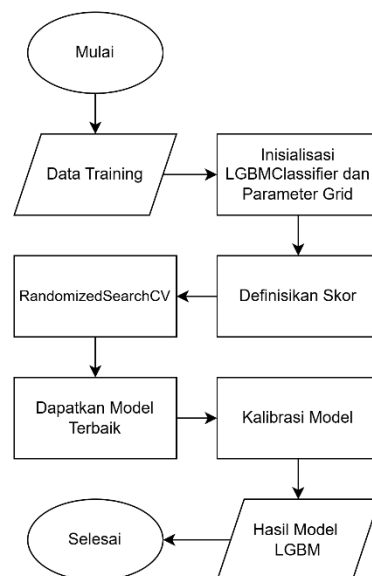


Gambar 3.4 *Flowchart Transformation*

#### d. *Data Mining*

Pada tahapan ini pemodelan xG dilakukan menggunakan algoritma LightGBM. Namun sebelum model dilatih, terdapat beberapa proses penting yang harus

dilakukan, yaitu pencarian *hyperparameter* terbaik dan kalibrasi probabilitas. Pencarian *hyperparameter* dilakukan dengan menggunakan *RandomizedSearchCV* sebanyak 100 iterasi, yang mengevaluasi berbagai kombinasi parameter dengan *5-fold cross-validation*. Proses ini menggunakan metrik skor *roc\_auc* sebagai acuan untuk menentukan kombinasi parameter terbaik dan secara otomatis melakukan *refit* pada model dengan skor tersebut. Setelah memperoleh model dengan konfigurasi terbaik, dilakukan kalibrasi probabilitas menggunakan *CalibratedClassifierCV* untuk memastikan bahwa prediksi probabilitas dari model merefleksikan tingkat kepercayaannya secara akurat (Davis & Robberechts, 2024). Selain pelatihan dan kalibrasi, tahap ini juga mencakup analisis fitur untuk memahami kontribusi tiap variabel dalam proses prediksi. Gambar 3.4 menunjukkan alur dari tahapan data *mining* dalam penelitian ini.

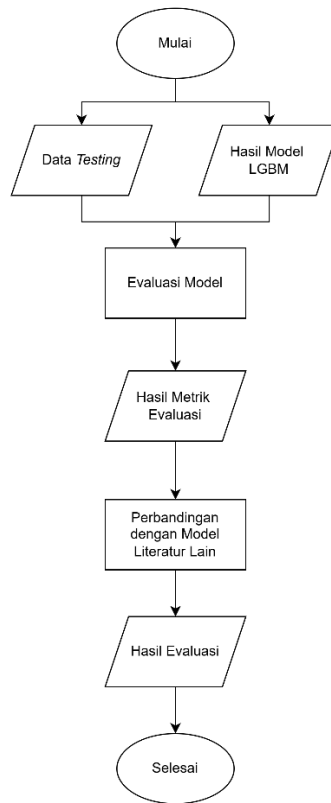


Gambar 3.5 *Flowchart Data Mining*

e. *Evaluation*

Setelah proses *data mining* selesai, tahap selanjutnya adalah evaluasi terhadap model yang telah dibuat. Evaluasi ini bertujuan untuk mengukur performa model secara komprehensif terhadap data uji. Sesuai dengan batasan masalah, evaluasi kinerja model akan menggunakan serangkaian metrik yang mencakup ROC AUC, *Brier Score*, presisi, *recall*, F1-Score, dan *Log-Loss*.

ROC AUC digunakan untuk menilai kemampuan diskriminatif model, yaitu kemampuannya dalam membedakan antara kelas positif dan negatif secara keseluruhan tanpa terikat pada ambang batas klasifikasi tertentu. Untuk mengukur akurasi dari prediksi probabilistik, digunakan *Brier Score* yang menghitung rata-rata selisih kuadrat antara probabilitas prediksi dengan hasil aktual, sehingga efektif dalam menilai kalibrasi model. Serupa dengan itu, *Log-Loss* juga memberikan penalti untuk prediksi yang tingkat keyakinannya tidak sesuai dengan hasil aktual. Terakhir, untuk evaluasi yang lebih bernuansa pada tugas klasifikasi, digunakan presisi, *recall*, dan F1-Score yang menganalisis keseimbangan antara keandalan prediksi positif (Presisi) dan kelengkapan dalam mengidentifikasi kasus positif (*recall*). *Flowchart* dari tahapan evaluasi model ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.6 *Flowchart Evaluation*

### 3.5.2 Pemodelan LightGBM

Pada penelitian ini, metode yang digunakan adalah LightGBM (*Light Gradient Boosting Machine*) untuk membangun model prediksi. LightGBM dirancang untuk menangani data berukuran besar dengan efisiensi tinggi melalui dua teknik utama: *Gradient-based One-Side Sampling* (GOSS) dan *Exclusive Feature Bundling* (EFB).

Teknik GOSS berfokus pada efisiensi pelatihan model dengan mempertahankan seluruh data yang memiliki nilai gradien besar yang mengandung lebih banyak informasi dan secara acak mengambil sebagian dari data dengan gradien kecil (Ke *et al.*, 2017). Namun, karena proses ini dapat mengubah distribusi



data asli, LightGBM memperkenalkan pengali konstan saat menghitung *information gain* untuk data dengan gradien kecil guna menyeimbangkan kontribusi antara dua kelompok data tersebut. Pendekatan ini memungkinkan model untuk tetap fokus pada sampel yang paling berpengaruh terhadap pembaruan model tanpa kehilangan akurasi secara signifikan.

Sementara itu, teknik EFB dirancang untuk mengatasi tantangan ketika terdapat banyak fitur yang bersifat saling eksklusif, yaitu fitur-fitur yang tidak pernah aktif secara bersamaan. Algoritma ini menggabungkan fitur-fitur eksklusif tersebut ke dalam fitur padat (*dense feature*) dalam jumlah yang jauh lebih sedikit, sehingga mengurangi dimensi data dan beban komputasi (Ke *et al.*, 2017). Selain itu, LightGBM juga mengoptimalkan algoritma histogram dasar dengan cara mengabaikan nilai nol pada fitur, yakni dengan mencatat hanya nilai-nilai non-nol menggunakan struktur data khusus. Kombinasi dari GOSS dan EFB menjadikan LightGBM sangat efisien dan *scalable* dalam membangun model prediksi dari *dataset* dengan jumlah *instance* dan fitur yang sangat besar.

### **3.6 Analisis Data dan Interpretasi Hasil**

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan pendekatan KDD (*Knowledge Discovery in Database*) yang mencakup lima tahapan utama: *data selection*, *preprocessing*, *transformation*, *data mining*, dan *evaluation*. Proses analisis dimulai dari tahap *data selection*, yaitu dengan menyiapkan *dataset* yang relevan untuk membangun model prediksi. Tahap selanjutnya adalah *preprocessing*

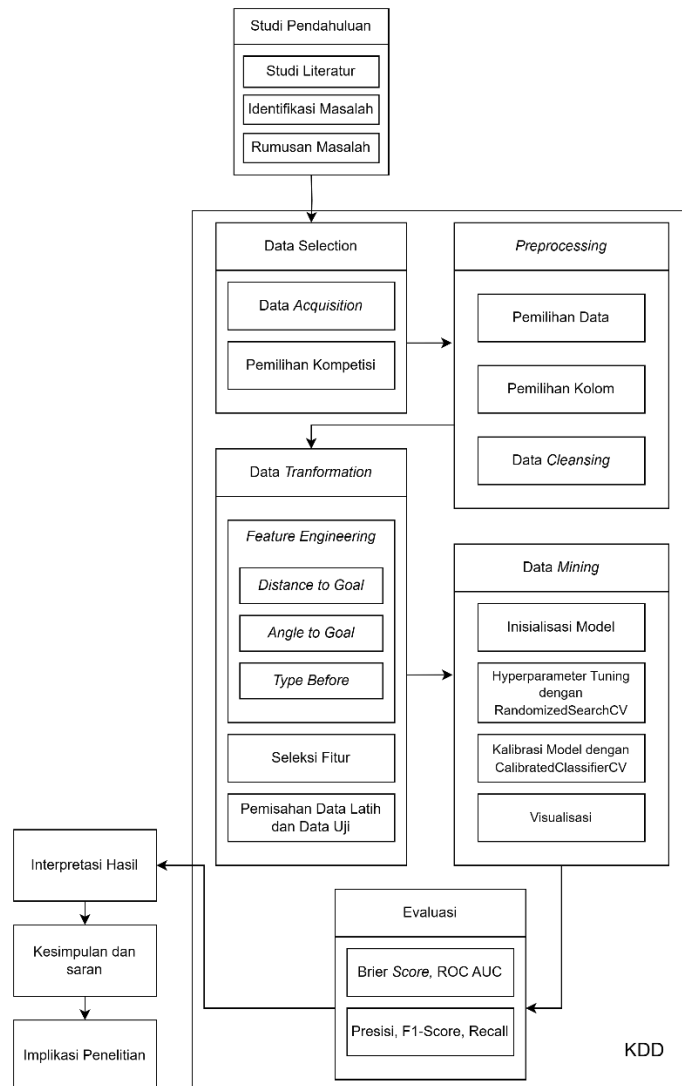
yang meliputi pembersihan data, penanganan *missing value*, penghapusan duplikasi.

Pada tahap *transformation*, dilakukan pembagian data menjadi data latih dan data uji, serta dilakukan transformasi fitur agar sesuai dengan kebutuhan algoritma yang digunakan. Tahap data *mining* dilakukan dengan membangun model prediksi menggunakan algoritma LightGBM, serta melakukan *hyperparameter tuning* menggunakan *RandomizedSearchCV* untuk memperoleh kombinasi parameter terbaik berdasarkan nilai skor ROC AUC.

Kemudian, pada tahap *evaluation*, performa model diukur secara komprehensif menggunakan serangkaian metrik. Metrik-metrik tersebut meliputi ROC AUC, *Brier Score*, presisi, *recall*, *F1-Score*, dan *Log-Loss* untuk menilai performa model dari berbagai aspek, mulai dari kemampuan diskriminatif hingga akurasi probabilistik. Hasil dari seluruh tahapan analisis ini serta interpretasi terhadap performa model akan dijelaskan secara rinci pada Bab 4.

### **3.7 Tahapan Penelitian**

Tahapan penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Tahapan Penelitian

Penelitian ini diawali dengan tahap studi literatur untuk mengidentifikasi dan merumuskan masalah penelitian. Pada tahap ini, dilakukan analisis mendalam terhadap sumber-sumber akademis seperti jurnal ilmiah, prosiding konferensi, dan laporan riset mutakhir. Tujuannya adalah untuk mendapatkan pemahaman yang komprehensif mengenai kondisi terkini (*state-of-the-art*), permasalahan yang ada, dan peluang riset di bidang analisis pertandingan sepak bola dengan teknik

pembelajaran mesin. Berdasarkan hasil studi literatur, masalah penelitian kemudian dirumuskan untuk menjadi dasar bagi tahapan selanjutnya yang menggunakan metode KDD (*data selection, preprocessing, transformation, data mining, dan evaluation*).

Pada tahap *data selection*, data dikumpulkan dengan mengunduh *dataset* publik dari GitHub yang berisi catatan pertandingan sepak bola, lalu difokuskan pada data *event* yang relevan untuk keperluan prediksi. Selanjutnya, dilakukan *preprocessing* berupa pemilihan variabel yang akan digunakan, pembersihan data dari nilai yang hilang dan duplikat, proses *encoding* untuk fitur kategorial, serta normalisasi data numerik.

Tahap berikutnya adalah *transformation* yang mencakup rekayasa fitur (*feature engineering*), analisis korelasi antar variabel, seleksi fitur penting, dan pembagian data menjadi set pelatihan dan pengujian. Pada tahap *data mining*, digunakan algoritma LightGBM dengan proses *tuning hyperparameter* melalui *RandomizedSearchCV*, serta dilanjutkan dengan proses kalibrasi model agar hasil prediksi probabilistik menjadi lebih akurat.

Tahap terakhir adalah *evaluation*, yaitu evaluasi performa model secara komprehensif menggunakan serangkaian metrik yang mencakup ROC AUC, *Brier Score*, presisi, *recall*, *F1-Score*, dan *Log-Loss* untuk menilai berbagai aspek kinerja model mulai dari kemampuan diskriminatif hingga akurasi probabilistik. Setelah seluruh tahapan metode KDD selesai, penelitian diakhiri dengan analisis hasil dan penarikan kesimpulan serta saran untuk penelitian selanjutnya.

### 3.8 Jadwal Penelitian

Rencana waktu pelaksanaan penelitian ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Waktu Pelaksanaan Penelitian

No.	Tahapan	Februari 2025	Maret 2025	April 2025	Mei 2025	Juni 2025	Juli 2025
1	Landasan Teori						
2	Pengumpulan Data						
3	Analisis Data						
4	Interpretasi						
5	Pembuatan Laporan						

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1     *Data Selection***

Tahap data *selection* merupakan langkah awal dalam proses analisis di mana data yang relevan dipilih dari sumber yang tersedia untuk digunakan dalam penelitian. Pada penelitian ini, data diperoleh dari repositori terbuka StatsBomb melalui GitHub, yang menyediakan data *event* pertandingan sepak bola dalam format JSON. Dari seluruh data yang tersedia, hanya data dengan tipe *event Shot* yang dipilih karena fokus penelitian adalah memprediksi kemungkinan terciptanya gol dari sebuah tembakan. Selain itu, hanya kolom-kolom tertentu yang dipilih, seperti informasi tentang teknik tembakan, bagian tubuh yang digunakan, pola permainan, serta posisi awal tembakan, karena kolom-kolom tersebut dianggap memiliki relevansi langsung terhadap peluang mencetak gol. Proses ini bertujuan untuk menyederhanakan *dataset* dan memastikan bahwa hanya fitur yang bermakna yang digunakan dalam tahap analisis selanjutnya.

##### **4.1.1   *Data Acquisition***

Penelitian ini menggunakan data dari repositori GitHub StatsBomb open-data yang diambil melalui proses unduhan menggunakan *tool* aria2 di Google Colab dengan bahasa pemrograman Python. Untuk mengakses data tersebut, pertama-tama dilakukan pengunduhan *file master.zip* yang berisi data pertandingan sepak bola. Berikut adalah tahapan yang dilakukan dalam proses pengumpulan data:

- a. Mengunduh *file* master.zip dari repositori GitHub StatsBomb open-data dengan menggunakan perintah di Google Colab dan *tool* aria2 untuk mempercepat proses unduhan.
- b. Menyusun skrip Python di Google Colab untuk mengekstrak semua *event* data yang ada pada file yang diunduh.
- c. Mengkonversi *event* data menjadi format *dataframe* menggunakan *pandas* untuk mempermudah pengolahan data lebih lanjut.
- d. Menyimpan *dataframe* yang telah diproses dalam format *parquet* untuk memudahkan analisis data selanjutnya. *Dataframe* yang dihasilkan mencakup berbagai kolom terkait informasi pertandingan, yang akan diseleksi dan diproses lebih lanjut untuk analisis yang lebih mendalam.

#### 4.1.2 Pemilihan Kompetisi

Langkah ini bertujuan untuk memastikan bahwa hanya data pertandingan yang relevan dan sesuai dengan fokus penelitian yang digunakan dalam proses analisis. Data mentah yang tersedia di repositori open-data StatsBomb mencakup berbagai jenis kompetisi, termasuk pertandingan pria, wanita, dan kelompok usia muda. Oleh karena itu, proses seleksi dilakukan secara sistematis untuk menyaring data berdasarkan dua kriteria utama: jenis kelamin peserta dan tingkat kompetisi.

Data kompetisi difilter untuk hanya menyertakan pertandingan pria dengan memeriksa atribut *competition\_gender* yang bernilai '*male*'. Selanjutnya, untuk memastikan bahwa hanya kompetisi tingkat senior yang disertakan, dilakukan pengecualian terhadap kompetisi yang mengandung kata kunci seperti 'U21', 'U23', 'U18', dan lainnya dalam nama kompetisi, yang menunjukkan kelompok usia muda.

Setelah mendapatkan daftar kompetisi yang valid, data pertandingan (*matches*) dari kompetisi tersebut dimuat dan difilter lebih lanjut untuk hanya menyertakan pertandingan antara dua tim pria. Proses ini menghasilkan kumpulan data pertandingan yang sesuai dengan fokus penelitian, yaitu analisis pertandingan sepak bola pria tingkat senior. Tabel 4.1 Menunjukkan Daftar Kompetisi yang akan digunakan.

Tabel 4.1 Daftar Kompetisi

<i>Competition ID</i>	<i>Season ID</i>	<i>Competition Name</i>
11	4	FIFA World Cup
2	44	Premier League
37	90	La Liga
72	30	UEFA Champions League
43	106	Bundesliga
49	3	Serie A
4	1	Ligue 1
55	27	Copa America
9	42	African Cup of Nations
16	1	Eredivisie

## 4.2 Data Preprocessing

Tahap *preprocessing* adalah tahapan yang berisi serangkaian proses untuk membersihkan dan menyiapkan data agar siap digunakan dalam analisis dan pemodelan pada tahapan selanjutnya. Dengan *preprocessing* yang tepat, kualitas data meningkat dan hasil pemodelan di tahap berikutnya menjadi lebih akurat dan andal.



#### 4.2.1 Pemilihan Data

Pemilihan jenis *event* yang tepat sangat krusial untuk memastikan relevansi dan kualitas analisis. Berdasarkan dokumentasi resmi dari StatsBomb, setiap peristiwa dalam pertandingan dikategorikan dengan identifier unik. *Event* dengan *type.id* 16 merepresentasikan aksi "*Shot*" atau tembakan, yang menjadi fokus utama dalam model xG karena langsung berkaitan dengan upaya mencetak gol.

Setelah data kompetisi kita dapatkan, maka selanjutnya kita akan mengambil data *event* yang sesuai dengan kompetisi yang kita dapatkan dengan mendapatkan *match\_id* yang akan digunakan nantinya. Kemudian kita akan menyimpan semua *event* yang sesuai dengan *match\_id* pada *file parquet*. Selanjutnya kita dapat memilih *event shot* yang ada pada setiap pertandingan untuk dijadikan *dataset* untuk pelatihan dan pengujian model nantinya. Hasil *dataframe* ditunjukkan pada Gambar 4.1.

period	minute	second	start_x	start_y	team_name	player_name	end_x	end_y	type	...
1	7	15	115.4	29.4	England	Harry Maguire	120.0	34.9	16	...
1	26	58	101.1	55.3	England	Bukayo Saka	117.5	41.9	16	...
1	29	8	113.4	49.1	England	Mason Mount	120.0	45.0	16	...
1	31	47	110.5	40.7	England	Harry Maguire	120.0	36.8	16	...
1	34	9	112.0	38.0	England	Jude Bellingham	120.0	43.0	16	...

Gambar 4.1 Hasil Pemilihan Data

#### 4.2.2 Pemilihan Kolom

Pada tahapan ini, proses awal yang dilakukan adalah memilih sub set data yang sesuai dengan tujuan penelitian. Dalam konteks prediksi xG, hanya data

dengan tipe *event Shot* yang diambil karena data tersebut merepresentasikan momen-momen tembakan yang menjadi fokus analisis. Setelah *event Shot* teridentifikasi, dilakukan proses seleksi kolom atau fitur yang dianggap memiliki nilai prediktif terhadap hasil tembakan (*shot outcome*). Fitur-fitur yang dipilih mencakup atribut spasial (seperti posisi awal dan akhir tembakan), temporal (menit dan detik), teknis (teknik tembakan, bagian tubuh yang digunakan), serta konteks permainan (tekanan lawan, pola permainan, dan tipe *event* sebelumnya). Fitur-fitur ini ditujukan untuk menangkap berbagai aspek yang dapat memengaruhi kemungkinan sebuah tembakan menjadi gol. Hasil seleksi kolom ditampilkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Nama dan Deskripsi Kolom

Nama Kolom	Deskripsi
<i>period</i>	Periode pertandingan saat tembakan terjadi
<i>minute</i>	Menit pertandingan saat tembakan dilakukan
<i>second</i>	Detik pertandingan saat tembakan dilakukan
<i>start_x, start_y</i>	Koordinat awal tembakan (lokasi pemain saat menembak)
<i>position</i>	Posisi pemain di dalam tim (Bek, Gelandang, Penyerang)
<i>shot_outcome</i>	Hasil tembakan (0 = tidak gol, 1 = gol)
<i>shot_body_part</i>	Bagian tubuh yang digunakan dalam menembak
<i>shot_first_time</i>	Apakah tembakan dilakukan secara langsung tanpa kontrol bola
<i>shot_one_on_one</i>	Apakah tembakan dilakukan dalam situasi satu lawan satu dengan kiper
<i>shot_open_goal</i>	Apakah tembakan dilakukan ke gawang yang kosong
<i>shot_aerial_won</i>	Apakah pemain memenangkan duel udara sebelum tembakan
<i>shot_key_pass</i>	Apakah tembakan didahului oleh umpan kunci
<i>possession</i>	Nomor penguasaan bola dari tim

<i>play_pattern</i>	Pola permainan yang terjadi sebelum tembakan
<i>under_pressure</i>	Apakah pemain berada dalam tekanan saat melakukan tembakan
<i>shot_technique</i>	Teknik tembakan yang digunakan

Pemilihan variabel ini bertujuan untuk menyederhanakan kompleksitas data serta meningkatkan fokus pada fitur-fitur yang relevan dalam konteks perhitungan xG. Langkah ini dilakukan untuk mengurangi redundansi informasi dan meminimalkan risiko *overfitting* akibat penggunaan variabel yang tidak informatif. Selain itu, untuk fitur-fitur yang bersifat kategorial, dilakukan pendekatan dengan mengambil langsung nilai ID atau representasi numerik yang sudah tersedia dari masing-masing kategori. Dengan demikian, proses ini menghindari kebutuhan akan transformasi tambahan seperti *one-hot encoding* atau *label encoding*, yang dapat menambah dimensi data secara signifikan tanpa memberikan kontribusi informatif yang sepadan. Pendekatan ini tidak hanya menjaga efisiensi pemrosesan data, tetapi juga mempertahankan struktur semantik dari variabel kategorial dalam bentuk yang lebih ringkas dan langsung digunakan oleh model. Gambar 4.2 menunjukkan contoh data setelah proses pemilihan variabel dilakukan.

	period	minute	second	location_x	...	technique
0	1	1	42	111.0	...	93
1	1	4	47	96.0	...	93
2	1	8	37	107.0	...	93
3	1	17	26	111.0	...	93
4	1	21	16	105.0	...	93
...	...	...	...	...	...	...
68863	2	65	39	106.1	...	93
68864	2	69	0	114.9	...	93
68865	2	82	41	103.6	...	93
68866	2	85	10	108.5	...	93
68867	2	85	58	117.0	...	91

Gambar 4.2 Contoh Data Sesudah Pemilihan Variabel

### 4.2.3 Data Cleansing

Tahap data *cleansing* dilakukan untuk memeriksa kelengkapan dan keunikan data dengan tujuan memastikan bahwa tidak terdapat nilai kosong (*missing values*) maupun data duplikat yang dapat memengaruhi proses analisis. Pada penelitian ini, proses pembersihan data menunjukkan bahwa data yang digunakan telah bersih secara struktural. Hal ini disebabkan oleh karakteristik data sepak bola yang cenderung unik di mana setiap peristiwa dalam pertandingan memiliki identitas dan konteks yang berbeda serta karena data yang disediakan oleh StatsBomb telah tersusun secara rapi dan konsisten. Struktur data yang baik ini sangat membantu dalam mempercepat proses *preprocessing* dan meningkatkan kualitas hasil analisis, karena tidak memerlukan upaya koreksi data secara signifikan.

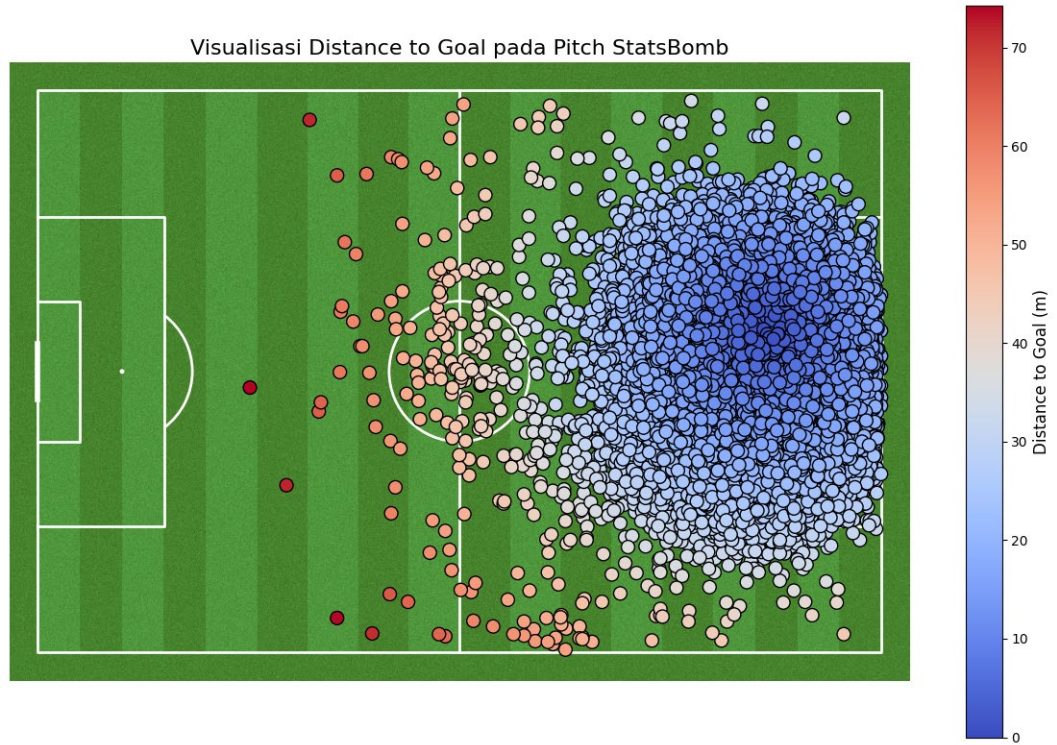
## 4.3 Data Transformation

### 4.3.1 Feature Engineering

Tahapan pertama dalam proses *transformation* pada penelitian ini adalah melakukan *feature engineering* dengan menambahkan tiga fitur baru, yaitu jarak dan sudut tembakan terhadap gawang serta kejadian sebelum terjadinya *shot*. Fitur ini ditambahkan untuk memberikan informasi spasial yang lebih kaya kepada model, mengingat lokasi dan sudut tembakan serta momentum sangat berpengaruh terhadap kemungkinan terciptanya gol.

*a. Distance to Goal*

Fitur pertama dalam proses *feature engineering* adalah menghitung jarak antara posisi tembakan dan pusat gawang. Informasi spasial ini penting karena jarak tembakan merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi kemungkinan terciptanya gol. Semakin dekat jarak tembakan ke gawang, secara umum peluang untuk mencetak gol menjadi lebih besar. Gambar 4.4 menunjukkan visualisasi fitur *distance to goal* pada lapangan pertandingan berdasarkan koordinat StatsBomb. Titik-titik pada visualisasi merepresentasikan lokasi awal tembakan, dengan warna yang menunjukkan jaraknya terhadap gawang, semakin biru berarti semakin dekat dan semakin merah berarti semakin jauh.



Gambar 4.3 Visualisasi *Distance to Goal*

Dalam *dataset* ini, koordinat pusat gawang StatsBomb berada pada titik ( $x = 104.0$ ,  $y = 34.0$ ), yang merepresentasikan titik tengah di antara dua tiang gawang. Jarak dihitung menggunakan rumus *Euclidean distance*, yaitu akar kuadrat dari jumlah kuadrat selisih antara koordinat tembakan dan koordinat pusat gawang. Secara matematis, perhitungan ini dinyatakan sebagai berikut:

$$Distance = \sqrt{(x_{goal} - x_{start})^2 + (y_{goal} - y_{start})^2} \quad (4.1)$$

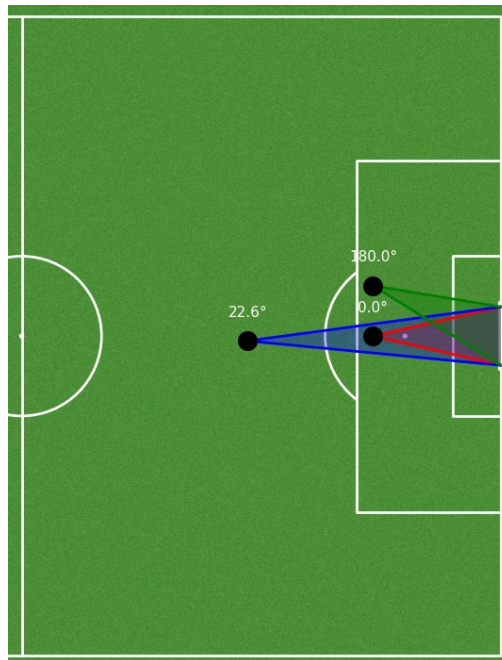
Fungsi ini diimplementasikan dalam kode Python yang akan mengembalikan nilai jarak dalam satuan relatif terhadap sistem koordinat StatsBomb. Hasil perhitungan disimpan dalam kolom baru bernama *distance\_to\_goal* dan digunakan sebagai salah satu fitur masukan dalam model prediksi. Gambar 4.7 menunjukkan contoh hasil dari proses penambahan fitur ini.

distance_to_goal
15.448625
14.905368
26.828716
10.837435
19.568598

Gambar 4.4 *Distance to Goal*

b. *Angle to Goal*

Selain jarak, fitur penting lainnya yang ditambahkan dalam proses *feature engineering* adalah sudut tembakan terhadap gawang, atau dikenal sebagai *open play angle*. Fitur ini merepresentasikan seberapa besar ruang terbuka yang tersedia bagi penembak untuk mengarahkan bola ke area di antara kedua tiang gawang. Semakin lebar sudut yang terbuka, semakin besar peluang tembakan untuk menghasilkan gol.



Gambar 4.5 Visualisasi Sudut Tembakan

Perhitungan sudut dilakukan dengan mengacu pada tiga titik, posisi tembakan dan dua titik tiang gawang (kanan dan kiri). Dalam sistem koordinat StatsBomb, gawang terletak pada posisi horizontal tetap yaitu  $x = 120$ , dengan tiang bawah (kanan) berada pada  $y = 43,66$  dan tiang atas (kiri) pada  $y = 36,34$ . Fungsi python digunakan untuk menghitung besar sudut terbuka menggunakan hukum cosinus. Langkah-langkahnya meliputi:

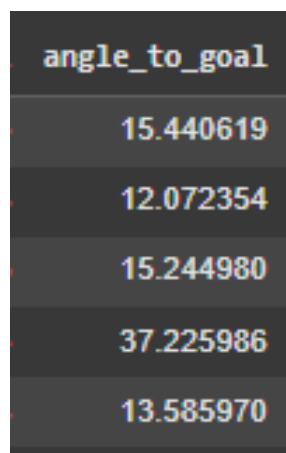
- i) Hitung jarak dari posisi tembakan ke masing-masing tiang gawang (A dan B).
- ii) Hitung panjang sisi antara kedua tiang (C).
- iii) Gunakan hukum cosinus untuk mencari sudut di antara kedua sisi tersebut.

Sudut dalam radian dikonversi ke derajat menggunakan fungsi `np.degrees()`.

Jika tembakan dilakukan tepat dari titik tengah gawang ( $x = 120$  dan  $y$  berada



antara dua tiang), maka sudut maksimal akan diberikan sebesar 180 derajat. Sebaliknya, jika posisi tembakan berada sejajar secara horizontal dengan gawang tetapi tidak dalam rentang vertikal antara tiang, maka sudut dianggap 0 derajat. Hasil perhitungan ini disimpan dalam kolom *angle\_to\_goal*, yang menjadi input penting dalam proses pemodelan. Gambar 4.5 menunjukkan hasil dari *feature engineering* tersebut.



angle_to_goal
15.440619
12.072354
15.244980
37.225986
13.585970

Gambar 4.6 *Angle to Goal*

c. *Type Before*

Fitur *type\_before* ditambahkan sebagai bagian dari proses *feature engineering* untuk memberikan konteks temporal terhadap peristiwa tembakan yang dianalisis. Fitur ini merepresentasikan jenis *event* yang terjadi tepat sebelum tembakan dilakukan, dengan mengambil nilai *type.id* dari *event* sebelumnya dalam urutan kronologis pertandingan. Informasi ini bertujuan untuk menangkap dinamika permainan yang mendahului tembakan, seperti apakah tembakan tersebut terjadi setelah dribel, operan, intersepsi, atau aksi defensif lawan. Tabel 4.3 beberapa *type.id* umum dalam data, yang digunakan untuk mengidentifikasi jenis peristiwa dalam pertandingan sepak bola.

Tabel 4.3 Deskripsi Jenis *type* dalam Pertandingan Sepak Bola.

Event Type	Type ID	Deskripsi Singkat
<i>50/50</i>	33	Dua pemain dari tim berbeda berebut bola lepas.
<i>Bad Behaviour</i>	24	Pelanggaran di luar permainan yang berujung kartu.
<i>Ball Receipt*</i>	42	Momen penerimaan atau usaha menerima operan.
<i>Ball Recovery</i>	2	Usaha merebut kembali bola lepas.
<i>Block</i>	6	Pemain menghalangi bola dengan tubuhnya.
<i>Carry</i>	43	Pemain menguasai bola saat bergerak atau diam.
<i>Clearance</i>	9	Menghalau bola dari area bahaya tanpa niat mengoper ke rekan.
<i>Dispossessed</i>	3	Pemain kehilangan bola karena ditekel tanpa mencoba dribel.
<i>Dribble</i>	14	Usaha pemain melewati lawan dengan menggiring bola.
<i>Dribbled Past</i>	39	Pemain dilewati oleh lawan saat dribel.
<i>Duel</i>	4	Duel 1v1 antara pemain dari tim berbeda.
<i>Error</i>	37	Kesalahan pemain yang mengarah pada tembakan lawan.
<i>Foul Committed</i>	22	Pelanggaran yang dilakukan terhadap lawan (tidak termasuk <i>offside</i> ).
<i>Foul Won</i>	21	Pelanggaran yang diterima dan menghasilkan tendangan bebas atau penalti.
<i>Goal Keeper</i>	23	Segala aksi penjaga gawang (penyelamatan, <i>smother</i> , <i>punch</i> , dll).
<i>Half End</i>	34	Peluit akhir babak pertandingan oleh wasit.
<i>Half Start</i>	18	Peluit awal babak pertandingan oleh wasit.
<i>Injury Stoppage</i>	40	Penghentian permainan karena cedera.
<i>Interception</i>	10	Pemain memotong jalur operan lawan untuk mencegah bola sampai ke target.
<i>Miscontrol</i>	38	Kehilangan kontrol bola karena sentuhan yang buruk.
<i>Offside</i>	8	Pelanggaran posisi <i>offside</i> .

<i>Own Goal Against</i>	20	Gol bunuh diri oleh tim sendiri.
<i>Own Goal For</i>	25	Gol bunuh diri yang menguntungkan tim.
<i>Pass</i>	30	Umpan dari satu pemain ke pemain lain.
<i>Player Off</i>	27	Pemain keluar lapangan tanpa pergantian (misalnya karena cedera).
<i>Player On</i>	26	Pemain kembali masuk ke lapangan setelah <i>Player Off</i> .
<i>Pressure</i>	17	Aksi menekan pemain lawan di area tertentu, direkam bersama durasi tekanan.
<i>Referee Ball-Drop</i>	41	Wasit menjatuhkan bola untuk melanjutkan pertandingan setelah jeda (misalnya cedera).
<i>Shield</i>	28	Pemain melindungi bola agar keluar lapangan tanpa dikejar lawan.
<i>Shot</i>	16	Upaya mencetak gol dengan bagian tubuh legal.
<i>Starting XI</i>	35	Informasi awal pemain yang bermain dan formasi tim.
<i>Substitution</i>	19	Pergantian pemain saat pertandingan berlangsung.
<i>Tactical Shift</i>	36	Perubahan posisi pemain atau formasi taktik dalam pertandingan.

Dengan menambahkan konteks ini, model dapat memahami alur permainan yang berujung pada tembakan dan mengenali pola peristiwa yang secara statistik lebih mungkin menghasilkan gol. Fitur *type\_before* diisi hanya jika terdapat *event* sebelumnya, jika tembakan merupakan *event* pertama dalam urutan, maka fitur ini dikosongkan. Gambar 4.7 menunjukkan hasil dari *feature engineering* tersebut.

type_before
2
43
42
4
4

Gambar 4.7 Type Before

#### 4.3.2 Seleksi Fitur

Tahap ini bertujuan untuk memilih fitur-fitur yang paling relevan dan berpengaruh terhadap prediksi model, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan akurasi pemodelan. Seleksi fitur dilakukan setelah proses *feature engineering* selesai, dengan mempertimbangkan konteks domain serta performa masing-masing fitur dalam mendukung prediksi *shot\_outcome*. Fitur yang memiliki kontribusi kecil atau *redundan* dapat dihilangkan untuk menghindari kompleksitas berlebih dan mengurangi risiko *overfitting*. Proses ini membantu model fokus pada informasi yang benar-benar penting. Tabel 4.1 menunjukkan fitur-fitur yang dipertahankan setelah melalui tahap seleksi.

Tabel 4.4 Fitur-Fitur Pada Tahap Seleksi

No.	Fitur
1	<i>minute</i>
2	<i>second</i>
3	<i>play_pattern</i>
4	<i>position</i>
5	<i>shot_technique</i>

6	<i>shot_body_part</i>
7	<i>shot_type</i>
8	<i>shot_first_time</i>
9	<i>shot_open_goal</i>
10	<i>shot_one_on_one</i>
11	<i>shot_aerial_won</i>
12	<i>under_pressure</i>
13	<i>distance_to_goal</i>
14	<i>angle_to_goal</i>
15	<i>shot_key_pass</i>
16	<i>start_x</i>
17	<i>start_y</i>
18	<i>possession</i>

#### 4.3.3 Pemisahan Data Uji dan Data Latih

Salah satu tahapan penting dalam proses *transformation* adalah pemisahan data menjadi data latih dan data uji. Tujuan dari proses ini adalah untuk mengevaluasi kinerja model secara objektif terhadap data yang belum pernah digunakan dalam proses pelatihan. Pemisahan data dilakukan menggunakan fungsi *train\_test\_split* dari *library scikit-learn*, dengan proporsi 90% data sebagai data latih dan 10% sebagai data uji. Parameter *random\_state* disetel ke angka 42 untuk menjamin konsistensi hasil pemisahan saat kode dijalankan ulang. Setelah proses ini dilakukan, diperoleh 61.981 baris data untuk pelatihan dan 6.887 baris data untuk pengujian. Gambar 4.6 menunjukkan jumlah baris dan kolom data latih dan uji.

	Train	Test
Rows	61981	6887
Columns	17	17

Gambar 4.8 Jumlah Baris dan Kolom Data Latih dan Uji.

## 4.4 Data Mining

Tahap *data mining* dalam penelitian ini bertujuan untuk membangun sebuah model prediktif. Prosesnya meliputi pembangunan model klasifikasi menggunakan algoritma LightGBM, optimasi untuk menemukan konfigurasi terbaik, dan diakhiri dengan kalibrasi untuk menyempurnakan hasil.

### 4.4.1 Pembangunan dan Optimasi Model

Proses ini merupakan tahap inti untuk menemukan arsitektur model dengan performa terbaik melalui serangkaian eksperimen yang sistematis untuk *hyperparameter tuning*.

#### a. Inisialisasi dan Ruang Pencarian *Hyperparameter*

Proses pemodelan diawali dengan inisialisasi LGBMClassifier. Untuk mendapatkan performa yang optimal, dilakukan proses *tuning* terhadap sejumlah *hyperparameter*. Ruang pencarian *hyperparameter* yang digunakan dalam penelitian ini, yang didefinisikan dalam metode *RandomizedSearchCV*, disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Ruang Pencarian *Hyperparameter*

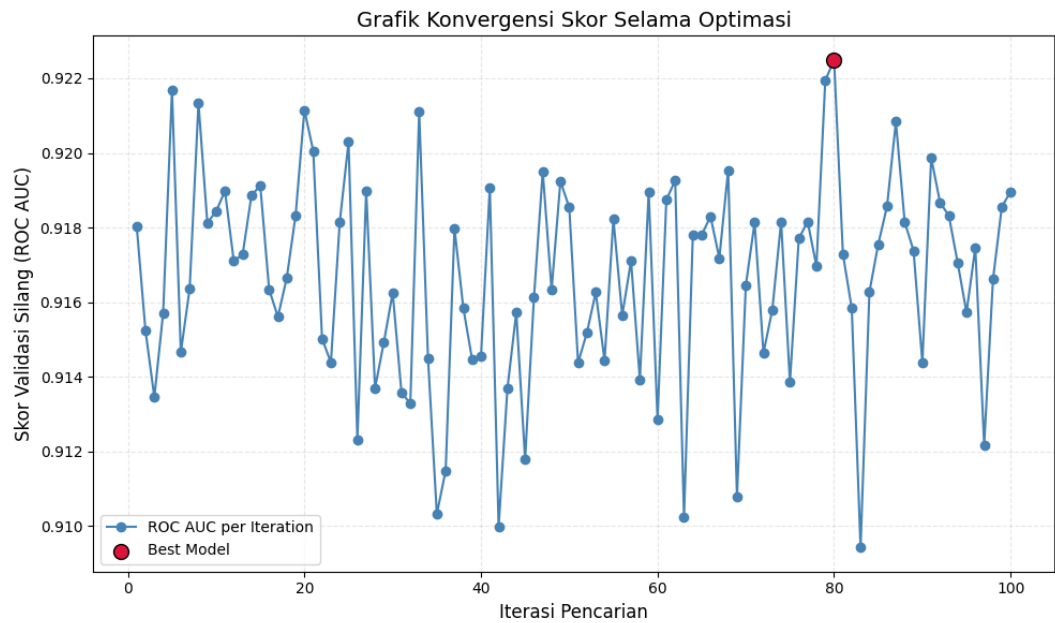
Nama <i>Hyperparameter</i>	Nilai yang Diuji
<i>min_child_samples</i>	Distribusi integer acak dari 0-200

<i>num_leaves</i>	Distribusi integer acak dari 2-500
<i>reg_lambda</i>	Distribusi uniform acak dari 0-1
<i>reg_alpha</i>	Distribusi uniform acak dari 0-1
<i>max_depth</i>	Distribusi integer acak dari 0-500

b. Proses dan Hasil Pencarian *Hyperparameter*

Pencarian kombinasi *hyperparameter* terbaik dari ruang pencarian pada Tabel 4.5 dilakukan menggunakan metode *RandomizedSearchCV*. Proses pencarian dijalankan dengan 100 iterasi acak ( $n\_iter=100$ ) dan menggunakan skema validasi silang 5-lipat ( $cv=5$ ). Metrik utama yang digunakan sebagai acuan skor (*scoring*) untuk proses optimasi adalah ROC AUC. Metrik ini dipilih karena kemampuannya dalam mengevaluasi performa model pada *dataset* yang tidak seimbang (*imbalanced*), seperti kasus prediksi gol dalam penelitian ini. Selain itu, *Brier Score* juga akan digunakan pada tahap evaluasi untuk memberikan analisis kinerja model yang lebih komprehensif.

Proses pencarian ini melalui banyak iterasi untuk menemukan performa terbaik. Gambar 4.9 menunjukkan fluktuasi skor ROC AUC pada setiap iterasi. Dari grafik tersebut, dapat diamati bahwa proses pencarian telah menjelajahi berbagai tingkat performa dan berhasil menemukan titik optimalnya, yang ditandai sebagai skor terbaik.



Gambar 4.9 Grafik Konvergensi Skor Selama Optimasi

Hasil dari 5 kombinasi *hyperparameter* teratas yang ditemukan selama proses pencarian disajikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Sampel Hasil Iterasi Pencarian (5 kombinasi teratas)

Peringkat	Skor ROC AUC	Std. Dev. ROC AUC	Konfigurasi <i>Hyperparameter</i>
1	0.922487	0.002236	<i>max_depth</i> : 3 <i>min_child_samples</i> : 38 <i>num_leaves</i> : 247 <i>reg_alpha</i> : 0.0037476264560935 <i>reg_lambda</i> : 0.08957163787773292
2	0.921943	0.002605	<i>max_depth</i> : 214 <i>min_child_samples</i> : 29 <i>num_leaves</i> : 9 <i>reg_alpha</i> : 0.39692635321320957 <i>reg_lambda</i> : 0.692687692563454



3	0.921676	0.002666	<i>max_depth</i> : 277 <i>min_child_samples</i> : 140 <i>num_leaves</i> : 16 <i>reg_alpha</i> : 0.4676403908711375 <i>reg_lambda</i> : 0.34475546004345525
4	0.921338	0.002779	<i>max_depth</i> : 415 <i>min_child_samples</i> : 118 <i>num_leaves</i> : 4 <i>reg_alpha</i> : 0.8967141844059426 <i>reg_lambda</i> : 0.1611149214433638
5	0.921151	0.002653	<i>max_depth</i> : 241 <i>min_child_samples</i> : 151 <i>num_leaves</i> : 24 <i>reg_alpha</i> : 0.8067867871234532 <i>reg_lambda</i> : 0.49103342846376574

c. Penetapan Model Terbaik

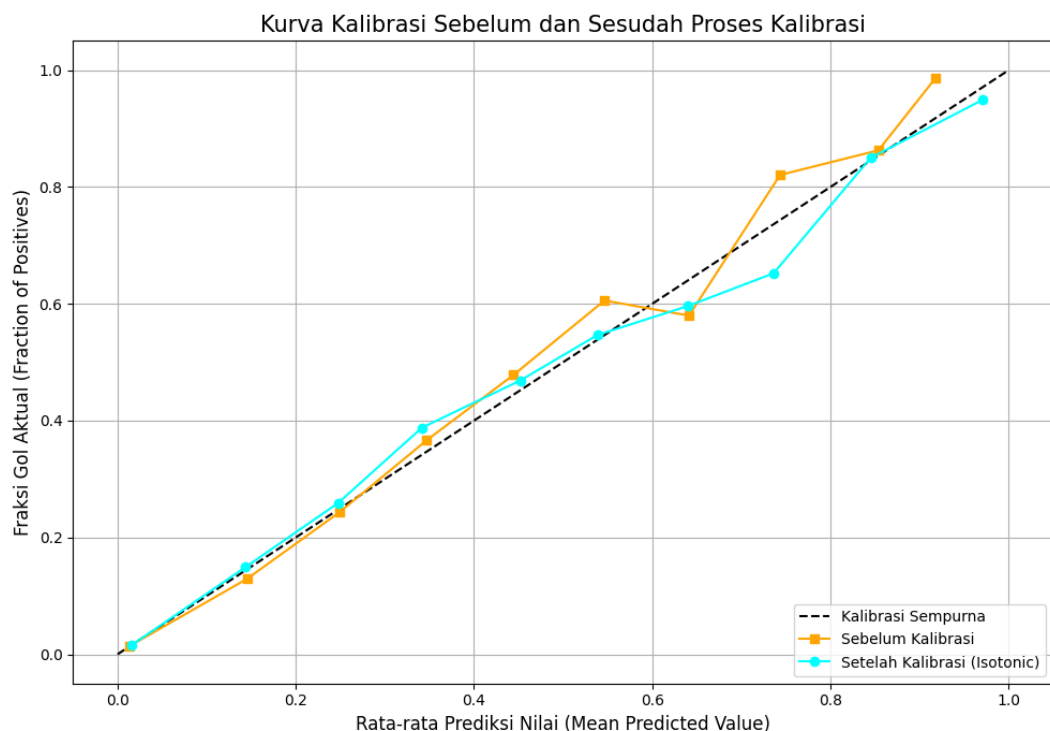
Berdasarkan hasil pencarian pada Tabel 4.6, model dengan konfigurasi pada Peringkat 1 ditetapkan sebagai model terbaik karena menghasilkan skor ROC AUC rata-rata tertinggi pada validasi silang, yaitu sebesar 0.915346. Model dengan konfigurasi *hyperparameter* inilah yang akan dilanjutkan ke tahap kalibrasi.

#### 4.4.2 Kalibrasi dan Finalisasi Model

Model terbaik yang telah ditetapkan selanjutnya melalui tahap kalibrasi probabilitas. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan keandalan nilai probabilitas

(nilai  $x_G$ ) yang dihasilkan oleh model agar lebih akurat dan tidak bias. Kalibrasi dilakukan menggunakan metode `CalibratedClassifierCV` dengan teknik Isotonic Regression.

Keberhasilan proses kalibrasi ini dibuktikan secara visual melalui Gambar 4.10. Gambar tersebut menampilkan perbandingan kurva sebelum (garis oranye) dan sesudah (garis *cyan*) proses kalibrasi. Dapat dianalisis bahwa kurva model yang telah terkalibrasi posisinya jauh lebih mendekati garis diagonal "kalibrasi sempurna" (garis putus-putus hitam). Hal ini menandakan bahwa output probabilitas (nilai  $x_G$ ) dari model kini lebih andal dan sesuai dengan proporsi gol yang sebenarnya terjadi di lapangan.



Gambar 4.10 Kurva Kalibrasi Sebelum dan Sesudah Proses Kalibrasi

## 4.5 Evaluation

Tahap evaluasi dilakukan terhadap data uji yang telah dipisahkan pada proses data *transformation*. Evaluasi bertujuan untuk mengukur sejauh mana model LightGBM mampu memberikan prediksi probabilistik yang akurat terhadap kemungkinan terciptanya gol (*expected goals*). Metrik evaluasi yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari dua metrik utama, yaitu *Brier Score* dan ROC AUC. Kedua metrik ini dipilih karena sesuai dengan tujuan dari model xG, yaitu menghasilkan prediksi dalam bentuk probabilitas, bukan klasifikasi biner semata. Tabel 4.6 berikut menunjukkan hasil evaluasi model LightGBM berdasarkan kedua metrik tersebut.

Tabel 4.7 Hasil Evaluasi Model LightGBM

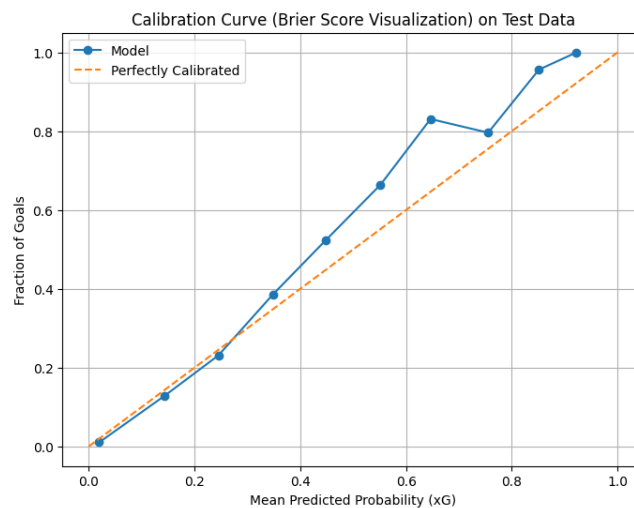
Metrik Evaluasi	Nilai
<i>Brier Score</i>	0.0626
ROC AUC	0.9207

#### 4.5.2 *Brier Score*

Nilai *Brier Score* sebesar 0.0663 mengindikasikan bahwa prediksi probabilitas yang dihasilkan oleh model memiliki tingkat kesalahan kuadrat yang sangat rendah. Hal ini menandakan bahwa model mampu mengestimasi peluang terciptanya gol secara akurat dan konsisten terhadap data aktual pada data uji. Dalam konteks model xG, nilai *Brier Score* yang rendah sangat penting karena model ini tidak hanya bertujuan untuk mengklasifikasi hasil tembakan, tetapi juga memberikan probabilitas yang merepresentasikan peluang realistis terjadinya gol.

Visualisasi hasil kalibrasi pada data uji ditampilkan pada Gambar 4.12, yang menunjukkan hubungan antara rata-rata probabilitas prediksi (xG) dan proporsi

aktual terjadinya gol (*fraction of goals*). Kurva yang mendekati garis diagonal membuktikan bahwa model memiliki kalibrasi yang baik dan dapat diandalkan dalam memberikan prediksi probabilitas.



Gambar 4.11 *Calibration Curve (Brier Score Visualization) on Test Data*

Lebih lanjut, nilai ini menunjukkan bahwa prediksi probabilitas yang dikeluarkan oleh model memiliki kalibrasi yang baik, artinya semakin tinggi nilai probabilitas prediksi suatu tembakan, maka semakin besar pula kecenderungannya untuk benar-benar menjadi gol dalam data aktual. Ini dibuktikan melalui kurva kalibrasi, di mana garis biru (hasil model) mengikuti dengan cukup dekat garis oranye putus-putus yang merepresentasikan kondisi kalibrasi sempurna. Meskipun terdapat sedikit deviasi pada beberapa titik terutama di rentang probabilitas menengah ke atas namun secara keseluruhan, distribusi prediksi tetap mencerminkan tren empiris yang logis dan stabil.

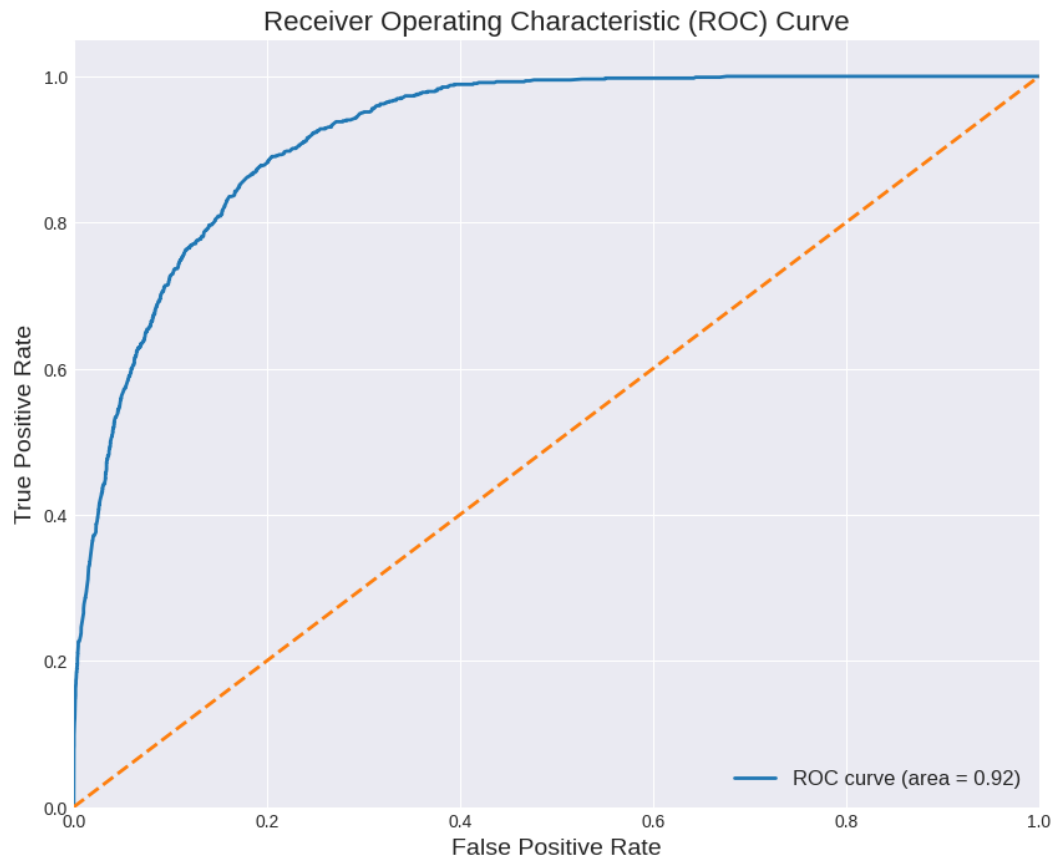
Kinerja ini menjadi indikator bahwa proses kalibrasi menggunakan metode *isotonic regression* berhasil menyesuaikan *output* model sehingga prediksi

probabilitas tidak bersifat *overconfident* maupun *underconfident*. Hal ini sangat krusial pada skenario data *imbalanced* seperti prediksi xG, di mana sebagian besar tembakan memang tidak berujung pada gol, dan model cenderung rawan bias terhadap mayoritas kelas.

### 4.5.3 ROC AUC

Model LightGBM menunjukkan performa diskriminatif yang sangat baik dengan nilai ROC AUC sebesar 0.9207. Nilai ini menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan yang sangat tinggi dalam membedakan antara tembakan yang menghasilkan gol dan tembakan yang tidak. ROC *curve* yang dihasilkan memiliki kurva yang menjauh signifikan dari garis diagonal (*random guess*), mengindikasikan bahwa model mampu mengidentifikasi *true positive* dengan tingkat *false positive* yang rendah pada sebagian besar *threshold*.

Performa ini juga memperlihatkan bahwa fitur-fitur yang digunakan dalam pelatihan, termasuk informasi spasial, teknik tembakan, serta konteks permainan (seperti tekanan dan posisi lawan), berhasil dikombinasikan secara efektif oleh model untuk mengenali pola-pola yang berkontribusi terhadap terciptanya gol. ROC *curve* yang stabil dan area kurva yang luas merupakan indikator bahwa model dapat digunakan dalam skenario nyata yang memerlukan prediksi *ranking* (misalnya untuk mengurutkan kualitas peluang tembakan). Visualisasi kinerja diskriminatif model ditampilkan pada Gambar 4.13, yang memperlihatkan perbandingan antara ROC *curve* model dengan *baseline random guess*.



Gambar 4.12 *Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve*

#### 4.5.4 Perbandingan dengan Model Pada Literatur Lain

Untuk menilai kinerja model yang dikembangkan dalam penelitian ini secara lebih komprehensif, dilakukan perbandingan terhadap hasil evaluasi dari beberapa model xG yang telah dikembangkan pada studi sebelumnya. Hasil dari model LightGBM yang dibangun dalam penelitian ini menunjukkan kinerja yang sangat kompetitif, dengan *Brier Score* sebesar 0.0663 dan ROC AUC sebesar 0.9134, mengungguli sebagian besar model yang ada dalam literatur terdahulu. Rangkuman perbandingan hasil evaluasi model pada beberapa studi terdahulu dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.8 Perbandingan Hasil Evaluasi Model xG pada Berbagai Literatur

Penulis & Tahun	Model	<i>Brier Score</i>	ROC AUC
Scholtes & Karakuş (2024)	<i>Bayesian Hierarchical</i>	0.075	–
ElHabr (2023)	XGBoost (Opta npxG)	0.0715	–
Cavus & Biecek (2022)	LightGBM	0.173	0.818
Haaren (2021)	<i>Boosting Machine</i>	0.082	0.793
Eggels et al. (2016)	<i>Random Forest</i>	–	0.814
Anzer & Bauer (2021)	GBM	–	0.822
Mead et al. (2023)	XGBoost	0.0799	0.800
<b>Model Penelitian ini</b>	LightGBM + Calibration	<b>0.0663</b>	<b>0.913</b>

Berdasarkan Tabel 4.7, model LightGBM yang dikembangkan dalam penelitian ini menunjukkan kinerja superior dibandingkan model-model xG yang telah dikembangkan sebelumnya. Dengan Brier Score sebesar 0.0663 dan ROC AUC 0.9134, model ini mencatatkan hasil terbaik di antara model pembanding.

Model ini mengungguli pendekatan Bayesian hierarchical dari Scholtes & Karakuş (2024) dengan Brier Score 0.075, meskipun ROC AUC tidak dilaporkan. Demikian pula, model ini lebih unggul dibandingkan XGBoost dari Opta npxG perusahaan sports analytics asal Inggris menurut ElHabr (2023) yang mencatat Brier Score 0.0715, meskipun tanpa nilai ROC AUC. Sementara itu, model LightGBM Cavus & Biecek (2022) menghasilkan Brier Score 0.173 dan ROC AUC 0.818, jauh di bawah model ini meskipun menggunakan algoritma yang sama.

Model ini juga lebih baik dibandingkan XGBoost Mead et al. (2023) dengan Brier Score 0.0799 dan ROC AUC 0.800, serta model Boosting Machine dari Haaren (2021) yang mencatat Brier 0.082 dan ROC AUC 0.793. Model klasik

seperti Random Forest (Eggels et al., 2016) dan GBM (Anzer & Bauer, 2021) masing-masing mencatat ROC AUC 0.814 dan 0.822, namun tanpa pelaporan Brier Score.

#### **4.6 Interpretasi Hasil**

Model expected goals (xG) yang dikembangkan dalam penelitian ini menunjukkan performa yang cukup baik dalam mengestimasi probabilitas terjadinya gol berdasarkan variabel-variabel yang relevan dalam situasi tembakan. Evaluasi performa model melalui metrik-metrik seperti Brier score, log loss, dan ROC-AUC mengindikasikan bahwa model memiliki tingkat akurasi prediksi yang memadai serta kestabilan yang layak untuk digunakan dalam konteks analisis performa sepak bola. Hal ini menunjukkan bahwa model mampu menangkap pola-pola signifikan dalam data historis dan menerjemahkannya menjadi prediksi probabilistik yang representatif terhadap kemungkinan terciptanya gol.

Untuk menginterpretasikan lebih lanjut kemampuan model dalam konteks dunia nyata, dilakukan penerapan perhitungan xG terhadap data spesifik dari suatu pertandingan sebagai studi kasus. Sebagai contoh, Tabel 4.8 menyajikan visualisasi distribusi nilai xG dari masing-masing peluang yang tercipta dalam pertandingan antara tim nasional Inggris melawan Iran pada Piala Dunia FIFA 2022. Hasil ini memberikan gambaran empiris mengenai kualitas peluang yang diciptakan oleh masing-masing tim selama pertandingan berlangsung, serta menunjukkan bagaimana model dapat digunakan untuk menganalisis efisiensi konversi peluang menjadi gol secara lebih objektif dan terukur.



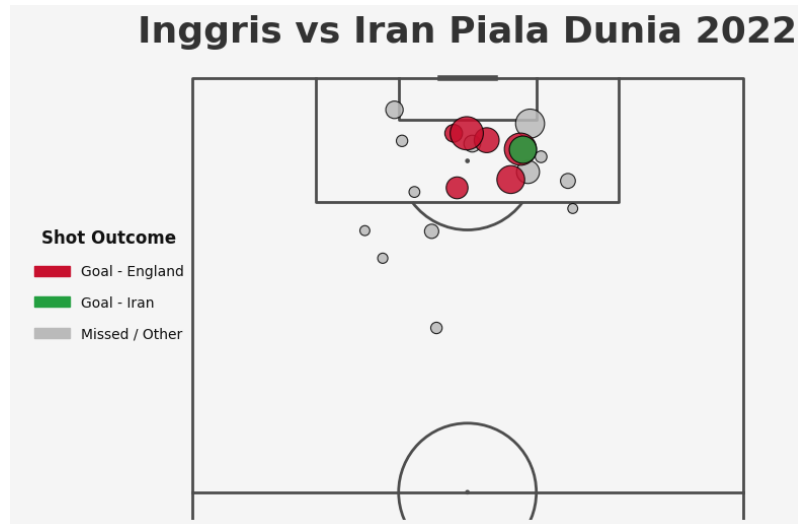
Tabel 4.9 Statistik Efektivitas Penyerangan Berdasarkan *Expected Goals*

Tim Nasional	Total <i>Expected Goals</i> (xG)	Jumlah Tembakan	Jumlah Gol Aktual	Rata-rata xG per Tembakan	Diferensial Gol (Gol – xG)
Inggris	3.09	13	6	0.238	+2.91
Iran	0.87	7	1	0.125	+0.13

Selain dari sisi akurasi prediktif, model xG yang dikembangkan juga memberikan kontribusi signifikan dalam konteks visualisasi dan analisis pertandingan sepak bola. Dengan kemampuannya mengkuantifikasi kualitas peluang secara numerik, model ini dapat menghasilkan metrik xG yang informatif dan aplikatif, sehingga dapat menjadi alat bantu strategis bagi tim analis dalam mengevaluasi performa tim maupun pemain secara lebih objektif. Analisis berbasis xG juga membuka ruang untuk interpretasi yang lebih dalam terhadap dinamika pertandingan, tidak hanya berdasarkan skor akhir, tetapi juga berdasarkan kualitas peluang yang diciptakan dan dihadapi.

Lebih lanjut, model ini juga dapat diintegrasikan sebagai alat ukur performa yang tervisualisasi secara intuitif dan informatif. Gambar 4.14 menyajikan visualisasi sebaran tembakan (shot map) beserta nilai xG masing-masing peluang yang terjadi pada pertandingan antara Inggris melawan Iran di Piala Dunia 2022. Visualisasi ini memungkinkan pemahaman spasial yang lebih baik terhadap lokasi dan kualitas peluang, serta membantu mengidentifikasi area-area strategis yang menjadi sumber utama ancaman serangan selama pertandingan. Dengan demikian,

model xG ini tidak hanya berfungsi sebagai alat prediksi, tetapi juga sebagai media analisis taktis yang kaya informasi.



Gambar 4.13 *Shot Map* Inggris vs Iran

Untuk mengevaluasi sejauh mana performa model xG ini dalam konteks prediksi pertandingan secara langsung, dilakukan perbandingan hasil prediksi dengan data xG yang disediakan oleh beberapa penyedia statistik sepak bola ternama seperti Opta, Pro Football Focus (PFF), FBref, dan xGScore. Perbandingan ini dilakukan pada tiga pertandingan kunci di ajang Piala Dunia 2022, yaitu Inggris vs Iran, Inggris vs Prancis, dan Argentina vs Kroasia, serta satu pertandingan final UEFA Euro 2024. Tabel 4.9 menyajikan nilai xG yang dihasilkan oleh model ini pada masing-masing pertandingan tersebut, beserta perbandingannya dengan estimasi dari penyedia statistik lainnya. Analisis ini bertujuan untuk menilai konsistensi dan validitas model dalam konteks aplikatif, serta menakar sejauh mana model yang dikembangkan mampu menghasilkan estimasi yang kompetitif dibandingkan dengan standar industri dalam bidang analisis sepak bola berbasis data.

Tabel 4.10 Perbandingan Model dengan Penyedia Statistik Sepak Bola

<i>Pertandingan</i>	<i>Skor</i>	<i>Sumber</i>	<i>xG Tim A</i>	<i>xG Tim B</i>
<i>England vs Iran – WC 2022</i>	6 – 2	<b>LGBM</b>	England: <b>3.09</b>	Iran: <b>0.87</b>
		Opta	England: 2.109	Iran: 1.751
		xGScore.io	England: 2.14	Iran: 1.42
		FBref	England: 2.1	Iran: 1.4
		PFF	England: 2.14	Iran: 1.62
<i>England vs France – WC 2022</i>	1 – 2	<b>LGBM</b>	England: <b>1.98</b>	France: <b>0.64</b>
		PFF	England: 2.4	France: 0.73
		xGScore.io	England: 2.55	France: 1.21
		FBref	England: 2.4	France: 0.9
		Opta	England: 2.407	France: 1.012
<i>Argentina vs Croatia – WC 2022</i>	3 – 0	<b>LGBM</b>	Argentina: <b>2.01</b>	Croatia: <b>0.95</b>
		PFF	Argentina: 2.12	Croatia: 0.30
		xGScore.io	Argentina: 2.76	Croatia: 0.57
		Opta	Argentina: 2.33	Croatia: 0.52
		FBref	Argentina: 2.3	Croatia: 0.5
<i>Spain vs England – Final EURO 2024</i>	2 – 1	<b>LGBM</b>	England: <b>0.67</b>	Spain: <b>1.63</b>
		xGScore.io	England: 0.63	Spain: 1.9
		FBref	England: 0.5	Spain: 1.9
		Opta	England: 0.527	Spain: 1.953
		PFF	–	–

Pada pertandingan antara Inggris melawan Iran di fase grup Piala Dunia 2022 yang berakhir dengan skor 6–2, model yang dikembangkan dalam penelitian ini menghasilkan estimasi nilai xG sebesar 3,09 untuk Inggris dan 0,87 untuk Iran. Jika dibandingkan dengan data dari penyedia statistik lainnya, terdapat perbedaan

yang cukup signifikan. Opta mencatat xG sebesar 2,109 (Inggris) dan 1,751 (Iran), sementara xgscore.io melaporkan nilai 2,14 (Inggris) dan 1,42 (Iran). FBref memberikan estimasi serupa yaitu 2,1 untuk Inggris dan 1,4 untuk Iran, sedangkan PFF mencatat 2,14 untuk Inggris dan 1,62 untuk Iran. Meskipun terdapat variasi antar penyedia, model ini menunjukkan kecenderungan yang lebih tinggi dalam memperkirakan dominasi Inggris, dengan nilai xG yang mencerminkan secara lebih jelas disparitas kualitas peluang yang tercipta di antara kedua tim.

Pada pertandingan perempat final antara Inggris dan Prancis (1–2), model ini memprediksi xG sebesar 1,98 untuk Inggris dan 0,64 untuk Prancis. Angka ini mengindikasikan bahwa Inggris menciptakan peluang dengan kualitas lebih tinggi dibanding Prancis, meskipun hasil akhir menunjukkan sebaliknya. Bila dibandingkan dengan penyedia data lainnya, PFF mencatat 2,4 (Inggris) dan 0,73 (Prancis), xgscore.io memberikan 2,55 dan 1,21, sementara FBref dan Opta masing-masing memperkirakan 2,4 dan 0,9 serta 2,407 dan 1,012. Secara umum, model ini memberikan estimasi yang lebih konservatif untuk Prancis, namun tetap sejalan dengan kesimpulan bahwa Inggris memiliki dominasi peluang dalam pertandingan tersebut.

Selanjutnya, pada laga semifinal antara Argentina dan Kroasia yang berakhir dengan kemenangan Argentina 3–0, model ini memperkirakan nilai xG sebesar 2,01 untuk Argentina dan 0,95 untuk Kroasia. Estimasi ini relatif sejalan dengan hasil observasi dan mendekati beberapa penyedia data resmi. PFF mencatat 2,12 untuk Argentina dan hanya 0,30 untuk Kroasia. Sementara itu, xgscore.io dan FBref memberikan nilai yang sedikit lebih tinggi untuk Argentina, yakni masing-

masing 2,76 dan 2,3, dan nilai lebih rendah untuk Kroasia, yaitu 0,57 dan 0,5. Opta memberikan estimasi sebesar 2,336 (Argentina) dan 0,520 (Kroasia). Secara umum, model ini menampilkan prediksi yang stabil dan mencerminkan keseimbangan realistis antara dominasi Argentina dan ketidakmampuan Kroasia menciptakan peluang berkualitas.

Terakhir, pada pertandingan final Euro 2024 antara Spanyol dan Inggris yang berakhir dengan kemenangan Spanyol 2–1, model ini menghasilkan nilai xG sebesar 1,63 untuk Spanyol dan 0,67 untuk Inggris. Estimasi ini mendekati angka dari beberapa penyedia statistik. Xgscore.io mencatat nilai sebesar 1,90 (Spanyol) dan 0,63 (Inggris), sementara FBref dan Opta memberikan hasil serupa, yakni 1,9 dan 0,5 (FBref), serta 1,953 dan 0,527 (Opta). Sayangnya, data dari PFF untuk pertandingan ini tidak tersedia. Perbandingan ini menunjukkan bahwa model yang dikembangkan mampu memberikan prediksi yang sejalan dengan tren umum yang tercermin dalam data statistik publik, sehingga memperkuat validitas model sebagai alat analisis performa pertandingan sepak bola tingkat tinggi.

#### **4.7 Keterbatasan Penelitian**

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, keterbatasan utama terletak pada kelengkapan dan cakupan data. *Dataset* yang digunakan berasal dari sumber open-data StatsBomb yang hanya mencakup liga dan turnamen tertentu, seperti Liga Inggris, La Liga, dan Piala Dunia. Hal ini membatasi kemampuan generalisasi model terhadap kompetisi lain yang memiliki karakteristik permainan berbeda, baik dari segi level kompetisi, gaya bermain,

maupun kualitas pemain. Selain itu, meskipun data StatsBomb dikenal kaya akan detail teknis, sejumlah fitur krusial dalam analisis xG seperti posisi kiper atau intensitas tekanan dari pemain bertahan tidak selalu tersedia atau hanya tersedia dalam jumlah terbatas (misalnya *freeze frame* data). Kekosongan ini dapat mengurangi kemampuan model dalam merepresentasikan konteks situasional dari suatu tembakan secara menyeluruh.

Kedua, keberlakuan model yang dibangun secara spesifik pada data dari satu liga atau turnamen tertentu dapat membatasi performanya ketika diterapkan pada kompetisi lain. Perbedaan gaya bermain antar liga, taktik dominan, tingkat kemampuan teknis pemain, serta kondisi permainan yang kontekstual dapat memengaruhi performa model secara signifikan. Dengan demikian, validitas eksternal dari model ini masih perlu diuji secara lebih luas sebelum dapat digunakan secara general.

Ketiga, keterbatasan dalam pemahaman domain atau domain *knowledge* turut menjadi tantangan dalam eksplorasi fitur. Tanpa pemahaman mendalam mengenai peran spesifik pemain, strategi taktis, dan pola permainan, terdapat kemungkinan bahwa beberapa fitur bersifat terlalu dangkal atau bahkan mengarah pada interpretasi yang menyesatkan. Hal ini menunjukkan pentingnya kolaborasi antara peneliti data dan praktisi atau analis sepak bola untuk memperkaya proses *feature engineering* dan interpretasi model.

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Penelitian ini melakukan penerapan model Light Gradient Boosting Machine (LGBM) untuk melakukan perhitungan metrik Expected Goals (xG) dalam konteks analisis performa tembakan pada pertandingan sepak bola. Data yang digunakan merupakan data tembakan yang telah melalui proses pembersihan dan praproses, serta dilakukan rekayasa fitur berbasis konteks spasial, temporal, dan teknis. Selanjutnya, dilakukan pelatihan model menggunakan algoritma LGBM, evaluasi performa dengan metrik seperti *Brier Score* dan ROC AUC, serta analisis interpretasi model menggunakan visualisasi SHAP dan distribusi nilai prediksi xG. Berdasarkan hasil pembahasan penerapan model LGBM untuk prediksi xG dalam pertandingan sepak bola, dapat ditarik kesimpulan:

- a. Penelitian ini menerapkan algoritma LightGBM untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam perhitungan xG dalam analisis sepak bola menggunakan *open-data* dari StatsBomb. Proses dimulai dengan tahapan *feature engineering* yang mencakup variabel-variabel penting seperti *distance\_to\_goal*, *angle\_to\_goal*, dan *type\_before* yang berperan signifikan dalam menentukan probabilitas terjadinya gol. Untuk meningkatkan kalibrasi prediksi probabilistik model, digunakan metode *CalibratedClassifierCV* dengan teknik *isotonic regression* dan *3-fold cross-validation*. Parameter model disetel secara spesifik guna mengoptimalkan performa, antara lain *boosting\_type = gbdt*, *num\_leaves*

= 15, *max\_depth* = 84, *learning\_rate* = 0.1, *n\_estimators* = 100, serta regulasi melalui *reg\_alpha* = 0.513 dan *reg\_lambda* = 0.971. Model juga dirancang dengan kontrol terhadap *overfitting* melalui *min\_child\_samples* = 146, *subsample* = 1.0, dan *colsample\_bytree* = 1.0. Hasil konfigurasi ini menunjukkan bahwa LightGBM dapat digunakan secara efisien dan akurat untuk memodelkan metrik xG dalam domain sepak bola, dengan mempertimbangkan kontribusi fitur-fitur relevan dan teknik kalibrasi prediktif.

- b. Performa algoritma LightGBM dalam perhitungan xG dievaluasi menggunakan dua metrik utama, yaitu *Area Under Curve* (AUC) dan Brier Score. Berdasarkan hasil evaluasi, model LightGBM menunjukkan nilai Brier Score sebesar 0.0663, yang mengindikasikan tingkat kalibrasi probabilistik yang sangat baik dan kesalahan prediksi yang rendah. Selain itu, nilai ROC AUC mencapai 0.9134, yang menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan diskriminatif yang sangat tinggi dalam membedakan antara peluang yang berujung pada gol dan yang tidak. Jika dibandingkan dengan model-model lain yang digunakan dalam studi ini, LightGBM menunjukkan performa yang relatif unggul berdasarkan kedua metrik evaluasi tersebut. Validasi tambahan terhadap hasil prediksi juga telah dilakukan pada data pertandingan nyata sebagaimana dijelaskan pada bagian interpretasi hasil. Model ini mampu menghasilkan estimasi xG yang selaras dengan konteks situasi pertandingan, sehingga menunjukkan potensi yang baik dalam penerapan nyata untuk analisis sepak bola.

## 5.2 Saran



Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, berikut beberapa saran yang dapat dijadikan dan dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya:

- a. Pada penelitian ini hanya menggunakan satu algoritma pembelajaran mesin, yaitu LightGBM, karena mempertimbangkan efisiensi dan kompleksitas model. Untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi dan membandingkan beberapa algoritma lain, seperti XGBoost, CatBoost, atau model berbasis neural network, guna memperoleh perspektif yang lebih komprehensif terkait performa dalam perhitungan xG.
- b. Fitur-fitur yang digunakan dalam model ini masih terbatas pada variabel yang tersedia dari open-data StatsBomb. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengayaan fitur, seperti memasukkan variabel taktis, posisi pemain bertahan lawan, atau kondisi pertandingan (misalnya skor sementara atau menit ke berapa dalam pertandingan), guna meningkatkan konteks spasial dan temporal dalam prediksi xG.
- c. Proses kalibrasi dilakukan menggunakan metode *isotonic* melalui *CalibratedClassifierCV*, namun belum dilakukan evaluasi terhadap metode kalibrasi alternatif. Penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan untuk membandingkan beberapa pendekatan kalibrasi, seperti *Platt scaling* atau *beta calibration*, untuk melihat dampaknya terhadap probabilitas prediktif model.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anzer, G., & Bauer, P. (2021). A goal scoring probability model for shots based on synchronized positional and event data in football (soccer). *Frontiers in Sports and Active Living*, 3, 624475.
- Bache-Mathiesen, L. K., Andersen, T. E., Dalen-Loretsen, T., Clarsen, B., & Fagerland, M. W. (2021). Not straightforward: Modelling non-linearity in training load and injury research. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 7(3), e001119. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2021-001119>
- Cavus, M., & Biecek, P. (2022). Explainable expected goal models for performance analysis in football analytics. 2022 IEEE 9th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA), 1–9. doi:10.1109/DSAA54385.2022.10032440
- Davis, J., & Robberechts, P. (2024). Biases in expected goals models confound finishing ability. *arXiv preprint arXiv:2401.09940*.
- Decroos, T., & Davis, J. (2019). Interpretable prediction of goals in soccer. In *Proceedings of the AAAI-20 workshop on artificial intelligence in team sports*.
- Eggels, H., Van Elk, R., & Pechenizkiy, M. (2016). Explaining soccer match outcomes with goal scoring opportunities predictive analytics. *3rd Workshop on Machine Learning and Data Mining for Sports Analytics (MLSA 2016)*. CEUR-WS.org
- ElHabr, T. (2023). *XG model calibration*. Tony ElHabr – Tony’s Blog. Retrieved May 11, 2025, from <https://tonyelhabr.rbind.io/posts/opta-xg-model-calibration/>
- Guan, Y., & Haran, M. (2018). A Computationally Efficient Projection-Based Approach for Spatial Generalized Linear Mixed Models. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 27(4), 701–714. <https://doi.org/10.1080/10618600.2018.1425625>

- Malikov, D., & Kim, J. (2024). Beyond xG: A Dual Prediction Model for Analyzing Player Performance Through Expected and Actual Goals in European Soccer Leagues. *Applied Sciences*, 14(22), 10390.
- Méndez, M., Montero, C., & Núñez, M. (2023). Improving the expected goal value in football using multilayer perceptron networks. *Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems* (pp. 352-363). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Mead J, O'Hare A, McMenemy P (2023) Expected goals in football: Improving model performance and demonstrating value. PLOS ONE 18(4): e0282295. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0282295>
- Mishra, V. N., Kumar, V., Prasad, R., & Punia, M. (2021). Geographically weighted method integrated with logistic regression for analyzing spatially varying accuracy measures of remote sensing image classification. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49(5), 1189–1199. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01286-2>
- McCulloch, C. E., & Neuhaus, J. M. (2011). Misspecifying the shape of a random effects distribution: Why getting it wrong may not matter. *Statistical Science*, 26(3), 388–402. <https://doi.org/10.1214/11-STS361>
- Bolker, B. M., Brooks, M. E., Clark, C. J., Geange, S. W., Poulsen, J. R., Stevens, M. H. H., & White, J.-S. S. (2009). Generalized linear mixed models: A practical guide for ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(3), 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.10.008>
- Mohammed, M. A., Kadhem, S. M., & Maisa'a, A. A. (2021). Insider attacker detection using light gradient boosting machine. *Tech-Knowledge*, 1(1), 67-76.
- Idris, H. I., Mohammed, A., Salisu, U. F., Balansana, K. I., Abdulazeez, D., & Danrimi, N. H. (2024). Evaluating the performances of robust logistic regression models in the presence of outliers. *African Journal of Mathematics and Statistics Studies*, 7(4), 320–327. <https://doi.org/10.52589/AJMSS-YKDFCYQS>

- Scholtes, A., & Karakuş, O. (2024). Bayes-xG: player and position correction on expected goals (xG) using Bayesian hierarchical approach. *Frontiers in sports and active living*, 6, 1348983. <https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1348983>
- Sutton, C., & McCallum, A. (2012). *An introduction to conditional random fields. Foundations and Trends® in Machine Learning*, 4(4), 267–373. <https://doi.org/10.1561/22000000013>
- Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., ... & Liu, T. Y. (2017). Lightgbm: A highly efficient gradient boosting decision tree. *Advances in neural information processing systems*, 30.
- Ramos, S., Soares, J., Cembranel, S. S., Tavares, I., Foroozandeh, Z., Vale, Z., & Fernandes, R. (2021). Data mining techniques for electricity customer characterization. *Procedia Computer Science*, 186(3), 475–488. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.04.168>
- Sheridan, R. P., Liaw, A., & Tudor, M. (2021). Light Gradient Boosting Machine as a regression method for quantitative structure-activity relationships. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2105.08626>