

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang Masalah**

Pemanfaatan tenaga listrik yang tidak tepat merupakan masalah yang kritis dan mendesak di sektor energi, dengan dampak ekonomi, lingkungan, dan sosial yang luas (Muzumdar et al., 2022). Malpraktik seperti penyadapan kabel, perusakan meteran, dan pemotongan peralatan mengakibatkan kerugian pendapatan yang cukup besar bagi perusahaan listrik, memperparah penipisan sumber daya, meningkatkan jejak karbon, dan menimbulkan risiko yang signifikan terhadap keselamatan manusia (Nawaz et al., 2023). Praktik-praktik seperti ini merusak penagihan yang akurat, membebani infrastruktur publik, dan menyebabkan peningkatan biaya yang dibebankan kepada pelanggan, yang pada akhirnya meningkatkan tekanan keuangan pada penyedia layanan dan pengguna akhir (Nazmul Hasan et al., 2019).

Pencurian listrik diperkirakan menyebabkan kerugian tahunan hingga miliaran dolar, secara signifikan merusak stabilitas keuangan perusahaan listrik dan menghambat investasi penting dalam modernisasi infrastruktur (Muzumdar et al., 2022). Konsekuensi lingkungan dari penyalahgunaan listrik sangat signifikan, mengakibatkan pemborosan energi yang tidak perlu dan peningkatan jejak karbon, yang secara langsung bertentangan dengan tujuan upaya internasional untuk mengurangi perubahan iklim global (Nawaz et al., 2023).

Besarnya masalah ini sangat besar, terutama di negara-negara berkembang seperti Indonesia, di mana infrastruktur energi masih dalam tahap perkembangan awal. Pencurian listrik merupakan bagian penting dari keseluruhan kerugian energi di seluruh negeri. Selain dampak finansial dan lingkungan yang signifikan, pencurian energi juga menimbulkan risiko keamanan serius yang secara langsung berdampak pada masyarakat. Perusakan meteran dan sambungan ilegal sangat berbahaya, berpotensi mengakibatkan kebakaran listrik, kerusakan peralatan yang luas, dan bahkan kematian, sehingga memperburuk gravitasi masalah ini (Nawaz et al., 2023).

Meskipun investasi yang terus menerus dan ekstensif dalam memodernisasi infrastruktur sistem kelistrikan di Indonesia, pencurian listrik merupakan masalah yang

meluas dan kronis, yang merugikan keberlanjutan energi jangka panjang dan pembangunan ekonomi negara. Faktor utamanya adalah ketidakefektifan langkah-langkah deteksi standar, seperti inspeksi manual dan penyelidikan setelah kejadian. Prosedur tradisional ini telah terbukti memakan waktu yang tidak perlu, tidak efektif terhadap metode yang canggih, dan tidak mampu mengimbangi kecanggihan aktivitas pencurian yang semakin berkembang (Nazmul Hasan et al., 2019).

Masalah penyalahgunaan listrik tidak hanya terjadi dari satu arah. Selain pencurian oleh konsumen, terdapat pula permasalahan dari sisi penyedia layanan yang memperburuk krisis kepercayaan dalam ekosistem energi. Kasus-kasus kesalahan penagihan, ketidakakuratan meteran, dan kurangnya transparansi dalam perhitungan biaya sering menimbulkan sengketa antara konsumen dan penyedia (Familia & Horne, 2022). Di berbagai negara, termasuk Indonesia, konsumen kerap melaporkan tagihan yang tidak wajar tanpa penjelasan memadai, sementara penyedia layanan kesulitan membuktikan akurasi tagihan mereka karena keterbatasan sistem pencatatan yang ada (P. Kumar et al., 2021).

Pendekatan yang ada tidak hanya sangat bergantung pada interaksi manusia, yang rentan terhadap kesalahan, korupsi, dan penundaan, tetapi juga secara mendasar gagal membangun satu sumber kebenaran (*a single source of truth*) yang dapat dipercaya oleh semua pihak (Essaaidi et al., 2021). Ketiadaan proses bukti yang objektif dan konklusif ini menciptakan lingkungan yang penuh dengan perdebatan dan ketidakpercayaan. Ketika anomali terdeteksi, bukti seringkali bersifat sementara, berfokus pada sistem perusahaan listrik, dan rentan terhadap manipulasi atau skeptisisme (Familia & Horne, 2022).

Dari perspektif konsumen, sistem meteran dan penagihan yang dikontrol sepenuhnya oleh penyedia menciptakan asimetri informasi yang fundamental. Konsumen tidak memiliki cara independen untuk memverifikasi akurasi pembacaan meteran atau menantang perhitungan yang mereka anggap tidak adil. Akibatnya, konsumen mungkin mempertanyakan keaslian denda atau tagihan yang tinggi, sementara pihak berwenang kesulitan melakukan audit yang efektif karena bukti hanya tersimpan dalam sistem internal yang tidak dapat diakses atau diverifikasi secara independen oleh pihak eksternal (Deebak & AL-Turjman, 2021).

Kondisi di atas menunjukkan bahwa akar masalah tidak hanya terletak pada mendeteksi adanya penyimpangan konsumsi, tetapi juga pada membuktikan dan

mengaudit data konsumsi secara adil ketika terjadi sengketa. Dalam praktiknya, sengketa dapat muncul karena anomali konsumsi yang benar-benar berasal dari penyalahgunaan, namun dapat pula muncul akibat ketidakakuratan perangkat meter/sensor, gangguan teknis, atau keterbatasan mekanisme pencatatan sehingga masing-masing pihak kesulitan menyajikan bukti yang dapat diterima bersama. Oleh karena itu, dibutuhkan *audit trail* yang objektif dan dapat ditelusuri *end-to-end* agar peristiwa konsumsi dan peristiwa anomali memiliki dasar bukti yang konsisten bagi konsumen, penyedia layanan, maupun auditor/regulator.

Tantangan ini diperburuk oleh kebutuhan akan transparansi ekstrem dalam sistem manajemen energi modern. Transparansi bukan lagi hanya fitur tambahan, tetapi prasyarat untuk membangun kepercayaan antara konsumen dan penyedia, di mana setiap titik data konsumsi dan peristiwa anomali harus dapat diverifikasi secara independen oleh semua pemangku kepentingan (P. Kumar et al., 2021). Tanpa dasar bukti yang kuat dan objektif, ekosistem energi akan terus menderita konflik yang merusak hubungan dan kolaborasi antar pihak (Deebak & AL-Turjman, 2021). Dengan latar belakang keterbatasan inilah, menjadi jelas bahwa solusi yang dibutuhkan harus menargetkan akar penyebab pencurian listrik sambil mempromosikan kerja sama dan kepercayaan di antara semua pihak melalui keamanan, keselamatan, dan transparansi (Nazir et al., 2024).

Penelitian sebelumnya telah mempelajari berbagai teknik untuk mencegah pencurian listrik, seperti penerapan teknologi *blockchain*, sensor *Internet of Things* (IoT), dan algoritma pembelajaran mesin. Teknologi *blockchain* telah muncul sebagai alternatif yang memungkinkan untuk menawarkan peningkatan keamanan data dan transparansi dalam transaksi energi melalui buku besar terdesentralisasi yang menjamin keabadian dan akuntabilitas. Dengan memotong perantara, teknologi *blockchain* menyediakan sarana yang aman dan tahan gangguan untuk mendaftarkan data penggunaan listrik, sehingga meningkatkan tingkat kepercayaan antara penyedia dan konsumen (Singh & Rathee, 2023). *Smart contract*, sebagai salah satu sifat *blockchain* yang mencolok, dapat mengotomatiskan validasi dan eksekusi transaksi, yang membantu meminimalkan permintaan untuk pemantauan manual dan meningkatkan efektivitas identifikasi anomali (Goyal & Kumar, 2022).

Namun demikian, posisi *blockchain* dalam penelitian ini bukan untuk “menggantikan” kebenaran sensor/meter secara otomatis, melainkan berfungsi sebagai

**lapisan kepercayaan (*trust layer*) dan mekanisme jejak audit (*auditability*).** *Blockchain* menjamin integritas data secara *end-to-end* sehingga peristiwa anomali yang terekam sulit dimanipulasi dan mudah diverifikasi lintas pihak. Dengan kata lain, *blockchain* menyediakan bukti digital yang konsisten dan tak terbantahkan, sedangkan akurasi pengukuran fisik tetap bergantung pada spesifikasi perangkat *metering* dan prosedur pemeliharaan teknis.

Dalam kerangka tersebut, keluaran deteksi anomali diperlakukan sebagai *evidence* awal yang perlu diverifikasi. Oleh karena itu, deteksi anomali diposisikan sebagai pemicu (*trigger*) mekanisme verifikasi lanjutan baik melalui inspeksi fisik, pemeriksaan instalasi, maupun kalibrasi meter/sensor untuk membedakan secara lebih andal apakah anomali merupakan indikasi pencurian listrik atau *Non-Technical Losses* (NTL), perubahan perilaku beban yang sah, atau deviasi akibat gangguan teknis pada perangkat ukur.

Demikian pula, sensor IoT telah digunakan untuk memantau konsumsi listrik secara *real-time*, dan data yang dihasilkan telah membantu mengidentifikasi anomali (Yap et al., 2023). Informasi *real-time* dari perangkat IoT dapat diproses untuk menemukan pola yang mengindikasikan adanya pencurian listrik, seperti perubahan dramatis pada tingkat penggunaan (Binyamin et al., 2024). Namun, besarnya data yang dihasilkan oleh perangkat IoT menjadi penghalang yang cukup besar, karena metode pemrosesan data standar mungkin tidak dapat mengimbangi volume dan kompleksitas data secara *real-time* (Albulayhi & Sheldon, 2021).

Teknik *machine learning* termasuk *Support Vector Machines* (SVM), *Random Forests*, dan *Neural Networks* telah digunakan untuk menemukan ketidaknormalan dalam data penggunaan listrik, sehingga memberikan prospek untuk mendeteksi pola-pola yang mengimplikasikan pencurian listrik (Wibowo et al., 2023). Algoritma-algoritma ini dapat mengevaluasi data dalam jumlah besar untuk menemukan ketidakberesan dalam pola penggunaan yang khas, sehingga memungkinkan untuk mendeteksi dugaan pencurian.

Namun, metode *machine learning* standar memiliki kesulitan skalabilitas dan efisiensi yang terdokumentasi dengan baik ketika berhadapan dengan data yang sangat besar dan berdimensi tinggi dalam aplikasi *real-time*. Sebagai contoh, banyak algoritma tradisional yang tidak mampu mengelola data dalam jumlah besar yang dihasilkan oleh perangkat IoT, yang dapat menyebabkan penundaan yang cukup lama dalam deteksi anomali dan meningkatkan biaya komputasi (Sasikumar et al., 2023). Selain itu, beberapa

algoritma *machine learning* memiliki kelemahan saat memproses set data yang tidak seimbang, di mana kasus pencurian energi jarang terjadi dibandingkan dengan pola konsumsi konvensional, yang sering kali menghasilkan akurasi yang buruk dalam deteksi anomali (X. Guo et al., 2023).

Terlepas dari kemajuan pada masing-masing teknologi, terdapat kesenjangan konseptual yang besar dalam literatur. Penelitian yang ada mencoba mempertimbangkan masalah ini terutama sebagai tugas deteksi, dengan fokus pada pengoptimalan akurasi algoritma (Iftikhar, Khan, et al., 2024). Namun, mereka umumnya mengabaikan masalah yang lebih dalam: bagaimana menerjemahkan hasil deteksi ini menjadi bukti yang dapat diverifikasi, tidak dapat disangkal (*non-repudiable*), dan dipercaya secara universal oleh semua pihak tanpa memerlukan otoritas pusat (Xu et al., 2019). Literatur saat ini tidak memiliki kerangka arsitektur yang secara komprehensif mengintegrasikan kecerdasan di perangkat *edge* (*edge intelligence*) untuk respons waktu nyata, dengan metode pembuatan bukti yang tidak dapat diubah (*immutable*) pada *blockchain*, untuk mengatasi dilema kepercayaan yang mendasari dalam konflik energi (Xie et al., 2020). Dengan kata lain, kesenjangan bukan pada ketiadaan teknologi, tetapi pada ketiadaan paradigma konseptual untuk verifikasi anomali yang terdesentralisasi dan berbasis kepercayaan.

Penelitian ini bertujuan untuk menjembatani kesenjangan konseptual tersebut melalui pengembangan kerangka kerja yang secara fundamental mengubah paradigma dari deteksi anomali menjadi verifikasi anomali yang dapat dipercaya. Alih-alih hanya membangun sistem deteksi, penelitian ini berfokus pada perancangan dan validasi sebuah kerangka kerja komprehensif yang mampu menghasilkan bukti digital yang tidak dapat diubah (*immutable digital evidence*) untuk setiap peristiwa anomali yang terdeteksi. Pendekatan ini memperkenalkan konsep "*verified facts*" dalam manajemen energi di mana setiap anomali bukan hanya terdeteksi, tetapi juga diverifikasi dan dicatat secara permanen dalam *ledger* terdesentralisasi yang dapat diaudit oleh semua pemangku kepentingan tanpa bergantung pada otoritas pusat. Dengan demikian, sistem tidak hanya mengatasi masalah teknis deteksi pencurian listrik, tetapi secara konseptual membangun fondasi baru untuk kepercayaan dan transparansi melalui bukti matematis yang dapat diverifikasi. Oleh karena itu, pertanyaan penelitian utama yang diajukan adalah: *Bagaimana sebuah kerangka kerja konseptual dapat dirancang untuk mentransformasi deteksi anomali real-time menjadi sistem verifikasi berbasis kepercayaan yang*

*menghasilkan bukti digital immutable, sehingga mampu membangun fondasi kepercayaan terdesentralisasi di antara para pemangku kepentingan energi tanpa memerlukan otoritas pusat?*

## 1.2 Identifikasi Masalah

Permasalahan utama yang diidentifikasi dalam penelitian ini adalah:

1. Penyalahgunaan listrik terjadi dari berbagai pihak konsumen (pencurian) maupun penyedia layanan (manipulasi data) menciptakan ketidakpercayaan bilateral.
2. Sistem deteksi konvensional bersifat tersentralisasi dan unilateral, sehingga bukti anomali hanya dikontrol satu pihak dan rentan terhadap sengketa.
3. Tidak ada mekanisme verifikasi independen yang memungkinkan kedua belah pihak memvalidasi bukti secara transparan.
4. Belum ada sistem yang mengintegrasikan deteksi *real-time* dengan pencatatan bukti yang tidak dapat diubah (*immutable*) untuk audit bersama.

## 1.3 Rumusan Masalah

Penelitian ini mengidentifikasi empat permasalahan fundamental yang saling berkaitan dalam sistem manajemen energi saat ini:

1. Tidak ada "sumber kebenaran tunggal" yang dapat diaudit bersama tanpa bergantung pada otoritas pusat.
2. Literatur fokus pada akurasi deteksi, namun mengabaikan cara mentransformasi hasil deteksi menjadi bukti yang dapat diverifikasi secara independen.
3. Belum ada kerangka kerja yang mengintegrasikan *edge intelligence* (deteksi *real-time*) dengan *blockchain* (pencatatan bukti *immutable*).
4. Teknologi IoT, AI, dan *blockchain* belum diintegrasikan untuk menciptakan sistem verifikasi anomali yang terdesentralisasi.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Selaras dengan rumusan masalah yang telah dipaparkan, penelitian ini memiliki serangkaian tujuan utama yang saling berkaitan untuk mengatasi tantangan deteksi penyalahgunaan listrik. Tujuannya adalah sebagai berikut.

1. Mengembangkan kerangka kerja konseptual ***Trust-Based Decentralized Anomaly Verification Framework (TDAVF)*** yang mengintegrasikan IoT, machine learning, dan *blockchain*.

2. Mengimplementasikan *proof-of-concept* yang mendemonstrasikan deteksi anomali *real-time* dan pencatatan bukti *immutable*.
3. Memvalidasi kelayakan teknis kerangka kerja melalui pengujian terkontrol.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memberikan manfaat dalam:

1. **Manfaat Akademik:** Memperkenalkan paradigma baru yang mengintegrasikan deteksi dan verifikasi untuk mengatasi dilema kepercayaan bilateral dalam sistem energi.
2. **Manfaat Praktis:** Menyediakan mekanisme bukti *immutable* yang dapat diakses semua pihak, menyederhanakan resolusi sengketa dan meningkatkan transparansi bilateral.
3. **Manfaat Sosial:** Mengurangi konflik dalam ekosistem energi dengan menciptakan "sumber kebenaran tunggal" objektif yang dapat diverifikasi independen.

### 1.6 Novelty

Kontribusi ilmiah utama yang diberikan dalam penelitian ini adalah kerangka kerja konseptual yang komprehensif untuk mengatasi kesulitan fundamental yang terkait dengan kepercayaan dan bukti dalam deteksi anomali konsumsi daya. Kerangka kerja ini, yang dinamai *Trust-Based Decentralized Anomaly Verification Framework* (TDAVF), memperkenalkan integrasi komprehensif yang memperluas fokus penelitian sebelumnya, dari sistem yang murni berfokus pada deteksi anomali, menjadi metode verifikasi anomali yang menghasilkan bukti digital yang tidak dapat diubah (*immutable*) dan dapat diaudit secara independen.

Inti dari kebaruan ini adalah kemampuan sistem untuk mengubah setiap peristiwa anomali menjadi sebuah fakta terverifikasi (*verified fact*) yang tercatat secara permanen di dalam *ledger* terdesentralisasi. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan jawaban teknis untuk mengenali penyalahgunaan listrik, tetapi secara konseptual membangun sebuah fondasi baru untuk kepercayaan (*trust*) dan transparansi di antara para pemangku kepentingan melalui bukti matematis yang dapat diverifikasi oleh semua pihak. Kebaruan spesifik penelitian ini meliputi:

1. Integrasi arsitektural komprehensif dari tiga teknologi (IoT, *Machine Learning*, *Blockchain*) dalam satu kerangka kerja terpadu yang mengatasi gap antara deteksi dan verifikasi.
2. Protokol verifikasi terdesentralisasi yang memungkinkan konsumen dan penyedia untuk secara independen memvalidasi data konsumsi dan anomali tanpa bergantung pada otoritas pusat.
3. Mekanisme *immutable evidence generation* yang mentransformasi setiap deteksi anomali menjadi bukti digital yang tercatat permanen dan dapat diaudit oleh semua pihak.

### 1.7 Ruang Lingkup dan Batasan

Untuk menjawab permasalahan di atas, penelitian ini dibingkai dalam ruang lingkup dan batasan yang jelas.

#### 1.7.1 Ruang Lingkup Penelitian

Fokus utama penelitian ini adalah pada perancangan dan implementasi prototipe dari sebuah kerangka kerja konseptual baru, yaitu **Trust-Based Decentralized Anomaly Verification Framework (TDAVF)**.

1. **Konseptual:** Pengembangan dan validasi paradigma TDAVF untuk verifikasi anomali terdesentralisasi.
2. **Implementasi:** Prototipe fungsional mengintegrasikan IoT *monitoring*, *machine learning detection*, dan *blockchain verification*.

#### 1.7.2 Batasan Penelitian

Penelitian ini berfokus pada validasi kelayakan (*proof-of-concept*) dari kerangka kerja TDAVF. Untuk mencapai tujuan ini, studi dibingkai oleh batasan metodologis yang spesifik dan disengaja:

1. Perangkat IoT secara metodologis ditempatkan di sisi konsumen, bukan di infrastruktur penyedia. Ini adalah keputusan desain yang esensial untuk menguji hipotesis transparansi bagi konsumen dan untuk menghindari hambatan regulasi serta risiko keamanan pemasangan di jaringan tegangan tinggi.
2. Penelitian ini difokuskan pada segmen konsumen residensial dengan ambang batas daya 900 VA, yang dipilih sebagai studi kasus representatif bagi kelompok pelanggan rumah tangga paling umum.

3. Mengingat data *ground truth* kasus penyalahgunaan bersifat rahasia dan tidak dapat diakses peneliti, metodologi pelabelan data anomali didasarkan pada standar teknis kelistrikan yang objektif (batas daya dan voltase standar PLN). Fokusnya adalah mendesentralisasi proses pembuktian pelanggaran standar tersebut.
4. Pengujian dilakukan dalam lingkungan terkontrol untuk mengukur kinerja teknis prototipe secara objektif, sebagai langkah esensial sebelum direkomendasikan untuk pengujian skala produksi.
5. Analisis mendalam mengenai kelayakan ekonomi (TCO/ROI) dan aspek legal/regulasi secara eksplisit berada di luar cakupan disertasi ini.
6. Hasil deteksi anomali pada prototipe TDAVF diperlakukan sebagai indikasi awal, sehingga tidak serta-merta menjadi vonis final terjadinya penyalahgunaan tanpa proses verifikasi lanjutan (misal audit/inspeksi/konfirmasi).
7. Implementasi prototipe TDAVF mengasumsikan adanya dukungan konektivitas jaringan (misal Wi-Fi/internet) pada sisi perangkat, serta dipengaruhi oleh biaya transaksi *blockchain* (*gas fee*). Aspek optimasi biaya dan strategi operasional skala besar dibahas sebagai bagian dari keterbatasan/arah pengembangan, bukan sebagai fokus evaluasi ekonomi penuh.
8. Dataset dan skenario pengujian pada penelitian ini belum secara dominan mencakup konteks pembangkit terdistribusi/panel surya (PV/DER) pada rumah tangga; pembahasan PV diarahkan sebagai perluasan (*roadmap*) untuk studi lanjutan.

### 1.8 Sistematika Penulisan

Disertasi ini disusun dan diorganisasikan ke dalam lima bab utama dengan sistematika sebagai berikut:

- **Bab I** menyajikan pendahuluan yang mencakup latar belakang masalah, identifikasi dan rumusan masalah, tujuan, manfaat, kebaruan penelitian, ruang lingkup, serta sistematika penulisan.
- **Bab II** menguraikan kajian pustaka yang relevan dan landasan teori yang menjadi dasar penelitian, mencakup konsep-konsep terkait IoT, *machine learning*, dan teknologi *blockchain*.

- **Bab III** memaparkan metodologi penelitian secara rinci, termasuk desain arsitektur sistem, prosedur pengumpulan data, teknik pemrosesan data, serta metode pemodelan dan evaluasi yang digunakan.
- **Bab IV** menyajikan hasil dari penelitian dan analisis data, termasuk kinerja model deteksi anomali, hasil implementasi *blockchain*, serta pembahasan temuan secara mendalam.
- **Bab V** berisi kesimpulan dari keseluruhan hasil penelitian, serta menyajikan implikasi dan rekomendasi untuk pengembangan penelitian di masa mendatang.



SEKOLAH PASCASARJANA