

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik adalah kebutuhan penting dalam kehidupan sehari-hari karena hampir semua aktivitas manusia memerlukan perangkat elektronik. Badan Energi Internasional mencatat bahwa permintaan listrik global meningkat sebesar 4,3% pada tahun 2024, lebih tinggi dibandingkan pertumbuhan sebesar 2,5% pada tahun sebelumnya [1]. Peningkatan kebutuhan listrik ini menunjukkan bahwa upaya efisiensi energi perlu dilakukan tidak hanya pada perangkat dengan konsumsi daya besar, tetapi juga pada konsumsi daya kecil yang terjadi secara terus-menerus.

Salah satu bentuk konsumsi daya yang sering tidak disadari yaitu *phantom load*. *Phantom load* adalah konsumsi daya listrik yang tetap terjadi ketika perangkat elektronik dalam keadaan mati, tetapi masih terhubung ke sumber listrik. Meskipun konsumsi daya pada setiap perangkat relatif kecil, akumulasinya selama perangkat terus terhubung dapat menyebabkan pemborosan energi dalam jangka panjang.

Di Indonesia, kebutuhan pemantauan dan efisiensi energi juga semakin penting seiring dengan perkembangan konsumsi energi dan listrik nasional. Data menunjukkan perkembangan indikator energi Indonesia selama periode 2014–2024 [2]. Kondisi ini mendorong perlunya sistem pemantauan yang dapat memberikan informasi lebih rinci mengenai konsumsi listrik perangkat rumah tangga, termasuk konsumsi daya yang tetap terjadi ketika perangkat tidak digunakan secara aktif.

Sistem pemantauan energi konvensional umumnya hanya menampilkan nilai arus, daya, atau energi total tanpa mengenali kondisi perangkat yang menjadi sumber konsumsi *phantom load*. Perangkat elektronik yang menggunakan komponen nonlinier dapat menghasilkan bentuk gelombang dan komponen harmonik arus yang berbeda. Penelitian menunjukkan bahwa komponen harmonik arus dapat digunakan sebagai fitur untuk membedakan karakteristik beberapa perangkat listrik [3]. Oleh karena itu, analisis harmonik dapat memberikan informasi tambahan yang tidak diperoleh jika proses identifikasi hanya mengandalkan nilai daya total.

Penelitian ini menggunakan sensor arus SCT-013-000 untuk memperoleh sinyal arus pada satu titik pengukuran. Sensor ini dipasang dengan cara menjepit konduktor tanpa memutus instalasi listrik utama [4]. Penggunaan satu sensor arus membuat proses pemasangan lebih sederhana dan sesuai dengan pendekatan non-intrusif untuk pemantauan beban listrik rumah tangga.

Sinyal arus hasil pengukuran kemudian diproses menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk memperoleh harmonik arus. Komponen tersebut digunakan bersama nilai arus RMS, daya semu, dan daya aktif sebagai fitur untuk merepresentasikan kondisi operasi perangkat. Penggunaan fitur harmonik dimaksudkan agar proses identifikasi tidak hanya didasarkan pada besarnya daya, tetapi juga mempertimbangkan pola frekuensi yang terbentuk dari karakteristik perangkat.

Untuk mempelajari hubungan antara fitur masukan dan kondisi perangkat, penelitian ini menggunakan model *Artificial Neural Network* (ANN). Model digunakan untuk mengklasifikasikan beberapa kondisi perangkat, yang meliputi kondisi mati, *idle*, tidur, dan aktif pada perangkat yang digunakan dalam penelitian. Hasil klasifikasi divalidasi menggunakan nilai *baseline* daya masing-masing kondisi perangkat.

Model ANN selanjutnya diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32-S3 sebagai bagian dari pendekatan Edge AI. Pendekatan ini memungkinkan proses klasifikasi dilakukan secara lokal pada perangkat tanpa mengirimkan data pengukuran ke sistem *cloud*. Penelitian menunjukkan bahwa model ANN dapat diterapkan pada perangkat dengan keterbatasan sumber daya untuk melakukan pengambilan keputusan secara lokal [5]. ESP32-S3 juga memiliki dukungan instruksi vektor yang dapat mempercepat pemrosesan sinyal dan komputasi model ANN [6].

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini mengadopsi konsep *Non-Intrusive Load Monitoring* karena pengukuran dilakukan menggunakan satu sensor pada jalur yang menghubungkan beberapa perangkat. Namun, penelitian ini tidak diarahkan untuk melakukan disagregasi energi rumah tangga secara menyeluruh. Fokus penelitian dibatasi pada identifikasi kondisi perangkat yang telah digunakan

dalam dataset serta penentuan indikasi *phantom load* berlebih berdasarkan hasil klasifikasi dan deviasi daya terhadap *baseline* masing-masing perangkat.

Penggunaan *baseline* dilakukan karena setiap perangkat memiliki tingkat konsumsi daya normal yang berbeda sehingga tidak terdapat satu ambang daya universal yang dapat diterapkan pada seluruh perangkat. Dalam deteksi anomali konsumsi energi, pola konsumsi normal dapat digunakan sebagai referensi untuk mengenali perubahan yang menyimpang dari perilaku sebelumnya [7]. Pada penelitian ini, *phantom load* berlebih ditentukan ketika hasil klasifikasi mengarah pada kondisi tidak aktif dan daya yang terukur melampaui nilai *baseline* beserta toleransi yang telah ditentukan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini merancang perangkat identifikasi *phantom load* menggunakan analisis harmonik arus dan Edge AI. Sistem menggunakan satu sensor SCT-013 000 untuk melakukan pengukuran arus, model ANN pada mikrokontroler untuk melakukan klasifikasi, serta validasi *baseline* untuk menentukan kondisi *phantom load* berlebih. Hasil pemantauannya akan ditampilkan melalui *Serial Monitor*, sedangkan peringatan *phantom load* berlebih dikirimkan melalui *Telegram*. Sistem juga akan mengakumulasi energi *phantom load* berlebih yang terdeteksi untuk menghasilkan estimasi energi terbuang dan biaya listrik pada akhir sesi pemantauan.

1.2 Penelitian Terkait

Penelitian Terkait merupakan bentuk penegasan keaslian sebuah karya agar dapat dipertanggungjawabkan dan menghindari tindakan plagiarisme sebagai bentuk pembajakan pada karya orang lain. Beberapa referensi yang relevan untuk penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Referensi utama penelitian

No	Judul	Peneliti	Tahun
1	<i>Reducing Energy Consumption by Stand-by Mode</i>	Dr. R.Gopalakrishnan,	2024

No	Judul	Peneliti	Tahun
		Dr.D.Sri Vidhya, Ms.S.Jaividhya	
2	<i>Edge Artificial Intelligence for Electrical Anomaly Detection Based on Process-In-Memory Chip</i>	Jianzi Jin, Xiang Qiu, Cimang Lu	2024
3	<i>Real-Time Non-Intrusive Load Monitoring for Low-Power Appliances Using Odd Current Harmonics</i>	Nimantha Madhushan, Udari Perera, Uditha Wijewardhana, Nishan Dharmaweera	2023
4	<i>Realtime IoT based Harmonics Monitoring System Review with Potential Low-Cost Devices with Experimental Case Study</i>	Purnomo, Aripriharta, Anik Nur Handayani, Rini Nur Hasanah, Norzanah Rosmin Gwo-Jiun Horng	2021

Paper [8] berfokus pada pengurangan konsumsi energi akibat mode *standby* perangkat elektronik dengan pendekatan sistem *monitoring* berbasis IoT. Pengembangan yang dilakukan adalah rancangan alat sederhana yang dapat mendeteksi konsumsi daya *standby* dan menampilkannya secara *real-time* melalui antarmuka LCD serta memberikan notifikasi melalui aplikasi seluler. Hasil dari penelitian ini menunjukkan pengguna akan menyadari akan adanya konsumsi daya pasif pada perangkat rumah tangga dan dapat mengambil tindakan manual untuk menguranginya.

Paper [3] membahas penerapan metode *Non-Intrusive Load Monitoring* (NILM) untuk mengidentifikasi perangkat elektronik berdaya rendah menggunakan analisis harmonik arus. Pengembangan yang dilakukan mencakup penerapan teknik ekstraksi fitur harmonik ganjil (orde ke-3, ke-5, ke-7) serta penerapan klasifikasi

beban berbasis machine learning untuk membedakan berbagai perangkat rumah tangga. Hasil dari penelitian ini menunjukkan tingkat akurasi pengenalan perangkat yang terdeteksi berada di atas 90%, dengan pemrosesan dilakukan secara *real-time* menggunakan sinyal arus sebagai input utama.

Paper [9] difokuskan pada pengembangan sistem monitoring harmonik berbasis IoT dengan menggunakan sensor arus dan tegangan berbiaya rendah. Penelitian yang dilakukan mencakup implementasi perangkat yang mampu membaca nilai THD (*Total Harmonic Distortion*) baik arus maupun tegangan, dan mengirimkannya ke aplikasi Android untuk ditampilkan secara *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi profil harmonik dengan error pengukuran yang masih dalam batas wajar (THD_v ~5,7%, THD_i ~4,5%) jika dibandingkan dengan alat pengukur laboratorium yang lebih mahal.

Paper [5] berfokus pada pengembangan sistem deteksi anomali kelistrikan berbasis *phantom load* menggunakan chip process-in-memory (PIM). Pengembangan utama terletak pada integrasi model neural network ringan ke dalam perangkat keras berdaya sangat rendah yang dapat menjalankan klasifikasi beban listrik dengan konsumsi daya hanya 8,7 mW. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi berbagai anomali listrik dan jenis beban dengan akurasi tinggi (hingga 99,9%) dan latensi sangat rendah (1–4 milidetik), yang cocok untuk implementasi di perangkat pemantauan listrik yang ringkas dan hemat energi.

Dari keempat penelitian tersebut, penelitian ini memiliki perbedaan yang menonjol, yaitu berfokus secara spesifik pada identifikasi *phantom load* menggunakan analisis harmonik arus dan klasifikasi beban berbasis *phantom load* yang dijalankan langsung pada mikrokontroler ESP32. Sistem dirancang untuk melakukan proses identifikasi dan klasifikasi secara lokal di perangkat (*on-device*) tanpa ketergantungan pada komputasi cloud, sehingga lebih efisien dari sisi biaya dan praktis untuk instalasi di lingkungan rumah tangga. Penelitian ini tidak hanya memantau konsumsi daya, tetapi juga menganalisis karakteristik harmonik arus untuk mengenali apakah suatu beban termasuk *phantom load* atau tidak. Sebagai bentuk *feedback* kepada pengguna, sistem menyediakan notifikasi berbasis

Telegram, sementara proses analisis dan pengambilan keputusan tetap dilakukan secara lokal pada perangkat.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan, maka bisa dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana rancang bangun perangkat identifikasi *phantom load* berbasis mikrokontroler ESP32 menggunakan analisis harmonik arus dan *Edge AI*?
2. Bagaimana kinerja perangkat identifikasi *phantom load* berbasis mikrokontroler ESP32 dalam mengidentifikasi kondisi *phantom load* pada berbagai perangkat elektronik rumah tangga?

1.4 Tujuan dan Manfaat

1.4.1 Tujuan

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Merancang dan mengimplementasikan perangkat identifikasi *phantom load* berbasis mikrokontroler ESP32 menggunakan analisis harmonik arus dan *phantom load*.
2. Menguji dan mengevaluasi kinerja perangkat dalam mengidentifikasi *phantom load* pada perangkat elektronik rumah tangga berdasarkan hasil klasifikasi yang dihasilkan.

1.4.2 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Manfaat Akademis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi akademis dalam pengembangan kajian identifikasi *phantom load* berbasis analisis harmonik arus dan *Edge Artificial Intelligence*, serta menambah referensi ilmiah terkait penerapan sistem pemantauan dan identifikasi beban listrik berbasis mikrokontroler.

2. Manfaat Praktis

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan solusi praktis bagi pengguna dalam mengidentifikasi dan mengurangi pemborosan daya listrik akibat *phantom load* melalui sistem identifikasi yang bekerja secara lokal dan real-time, serta memberikan informasi kepada pengguna melalui notifikasi sebagai bentuk peningkatan kesadaran efisiensi energi.

1.5 Batasan Masalah

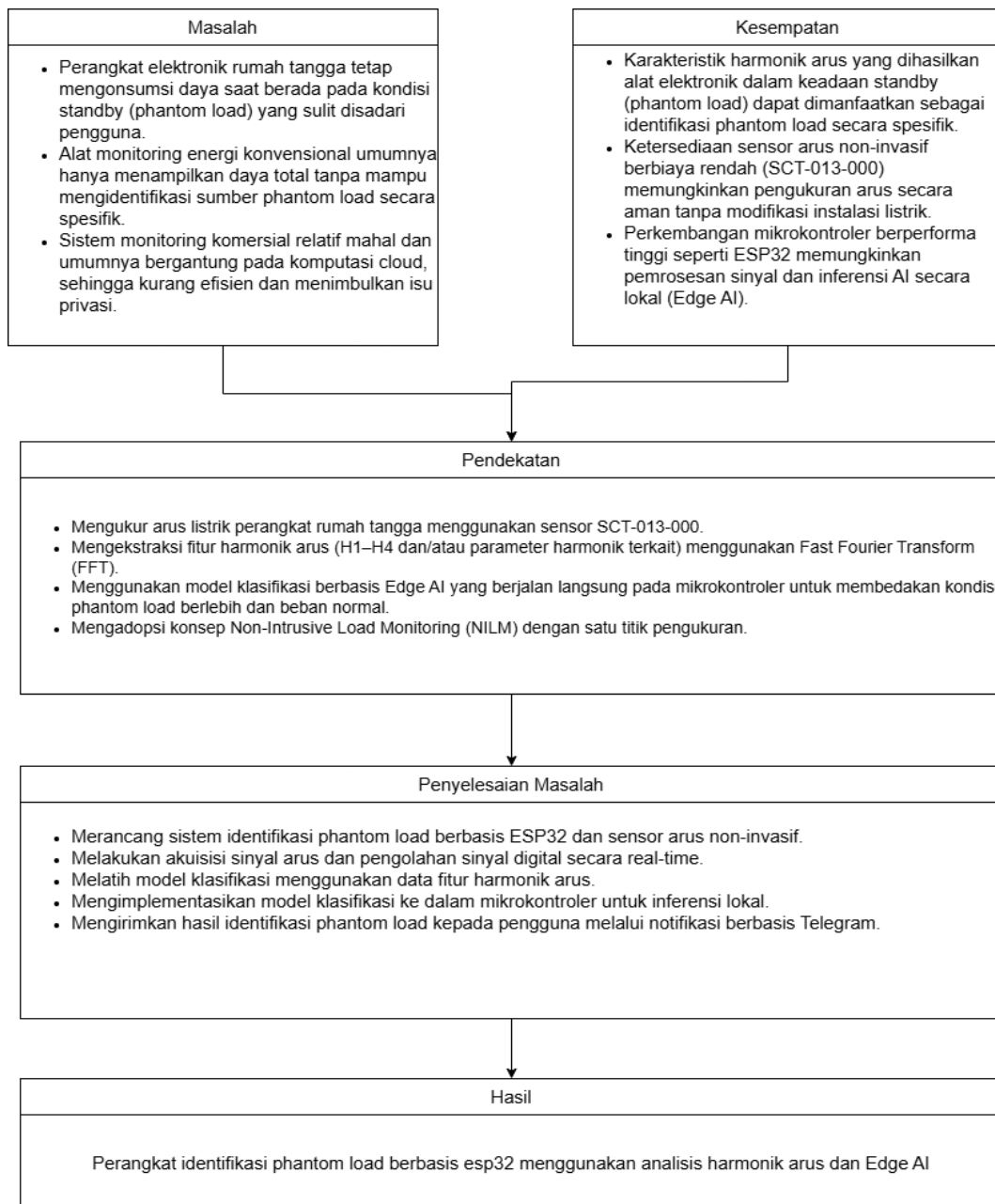
Batasan masalah dibuat untuk menghindari adanya penyimpangan atau perluasan topik, agar penelitian lebih terarah dan mudah dibahas, sehingga dapat mencapai tujuan penelitian. Berikut merupakan batasan masalah dalam penelitian ini:

1. Penelitian difokuskan pada identifikasi *phantom load* berlebih pada perangkat elektronik rumah tangga yang berada dalam kondisi *standby* dan tidak aktif, yaitu televisi dan laptop.
2. Sistem hanya menggunakan satu sensor arus SCT-013-000 dan satu mikrokontroler ESP32, tanpa pengukuran tegangan secara langsung untuk proses identifikasi.
3. Tegangan suplai rumah tangga diasumsikan stabil pada sistem satu fasa 220V dan diperoleh melalui pengukuran menggunakan multimeter sebagai nilai referensi.
4. Identifikasi *phantom load* dilakukan berdasarkan penyimpangan karakteristik arus terhadap nilai *baseline* masing-masing perangkat, bukan menggunakan batas universal.
5. Analisis sinyal dibatasi pada rentang frekuensi 50 Hz hingga 1 kHz, dengan fitur berupa harmonik arus orde rendah dan nilai hasil FFT.
6. Sistem bekerja secara lokal pada perangkat, dengan notifikasi berbasis Telegram yang bersifat *event-based* dan diperiksa setiap 30 detik.

1.6 Kerangka berpikir

Kerangka berpikir yaitu berisi alur pemikiran yang memuat uraian sistematis hasil perumusan masalah penelitian yang diperkirakan dapat diselesaikan melalui

pendekatan yang dibutuhkan. kerangka berpikir ini dapat dijabarkan sebagai berikut:



Gambar 1.1 Kerangka berpikir

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini terdiri dari enam bab, yaitu sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas latar belakang permasalahan terkait rendahnya kesadaran masyarakat terhadap keberadaan *phantom load* pada perangkat elektronik rumah tangga. Selain itu, bab ini memuat perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta kerangka berpikir yang menjadi dasar dan arah penelitian.

BAB II TEORI DASAR

Bab ini menyajikan landasan teori yang mendukung penelitian, meliputi konsep *phantom load*, karakteristik beban listrik nonlinier, analisis harmonik arus, Fast Fourier Transform (FFT), Edge Artificial Intelligence, mikrokontroler ESP32-S3 dan sensor SCT-013-000.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode penelitian yang digunakan, meliputi tahapan perancangan sistem, metode pengambilan dataset, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, serta alur pengujian sistem yang dilakukan dalam penelitian ini.

BAB IV PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM

Bab ini membahas perancangan dan implementasi sistem identifikasi *phantom load* secara menyeluruh. Pembahasan meliputi perancangan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, implementasi firmware pada mikrokontroler ESP32-S3, serta integrasi model Edge Artificial Intelligence dan sistem notifikasi.

BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM

Bab ini menyajikan hasil pengujian sistem yang telah diimplementasikan, meliputi pengujian dataset, pengujian klasifikasi, pengujian implementasi model, pengujian identifikasi *phantom load* secara *real-time*, serta estimasi biaya yang dikeluarkan. Selain itu, bab ini juga memuat analisis hasil pengujian untuk mengevaluasi kinerja, keandalan, dan keterbatasan sistem yang dikembangkan.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian berdasarkan tujuan yang telah ditetapkan, serta saran pengembangan yang dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya untuk meningkatkan kinerja dan cakupan sistem identifikasi *phantom load*.