

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Implementasi Undang-Undang Nomor 33 Tahun 2014 tentang Jaminan Produk Halal (JPH) menuntut kesiapan infrastruktur pengujian analitik yang masif di sektor industri, khususnya pada rantai pasok biomaterial seperti gelatin. Tingginya angka permintaan pasar global serta disparitas harga bahan baku hewani kerap memicu eskalasi praktik pemalsuan makanan (*food adulteration*). Praktik penipuan komersial ini umumnya melibatkan substitusi atau pencampuran turunan babi (*porcine*) ke dalam produk berlabel halal, yang tidak hanya menimbulkan kerugian ekonomi, tetapi juga melanggar batas keyakinan serta kesehatan konsumen (Pulluri & Kumar, 2022). Kondisi ini mendesak hadirnya instrumen skrining cepat (*rapid screening*) yang mampu beroperasi secara efektif dan real-time untuk mendukung inspeksi harian di fasilitas produksi.

Selama ini, berbagai metode analitik konvensional, seperti spektroskopi inframerah transformasi Fourier (FTIR) serta teknik amplifikasi DNA berbasis *Polymerase Chain Reaction* (PCR), telah digunakan secara luas sebagai standar dalam analisis dan autentikasi pangan karena kemampuannya dalam memberikan tingkat akurasi yang tinggi hingga skala molekuler. Namun demikian, penerapan metode-metode tersebut masih dihadapkan pada sejumlah keterbatasan praktis. Instrumen forensik berbasis laboratorium umumnya memerlukan tenaga ahli dengan kompetensi khusus, melibatkan prosedur analisis yang bersifat destruktif terhadap sampel, serta memakan waktu pada tahapan preparasi yang kompleks dan biaya operasional pemeliharaan peralatan yang relatif tinggi untuk pengujian berskala luas (Tan & Xu, 2020). Berbagai limitasi laboratorium tersebut mendorong pengembangan *Electronic Nose* (E-Nose) berbasis sensor *Metal-Oxide Semiconductor* (MOS) sebagai alternatif teknologi skrining yang cepat, non-destruktif, dan sesuai untuk pemantauan secara *real-time* (Khorramifar dkk., 2023).

Meskipun tanggap dan cepat, tantangan analitik terberat dalam instrumentasi E-Nose terletak pada tingginya derajat sensitivitas silang (*cross-sensitivity*) akibat penggunaan deret sensor yang bersifat tidak spesifik (Winsen, 2020). Berdasarkan studi volatilomik terdahulu menggunakan instrumen kromatografi (GC-MS), biomaterial hewani seperti gelatin sapi dan ikan diketahui saling berbagi fraksi senyawa penanda volatil utama seperti kelompok aldehida dan keton dengan tingkat kelimpahan relatif yang nyaris identik (Darmawan dkk., 2024; Ismarti dkk., 2022). Kemiripan emisi gas di tingkat molekuler inilah yang memicu fenomena tumpang tindih (*overlapping*) pola fluktuasi sinyal secara masif di dalam ruang sensor (*sensor chamber*). Pada data E-Nose yang bersifat time-series dan berderau, penggunaan algoritma kemometrik manual seperti PCA cenderung terbatas karena hanya melakukan reduksi dimensi secara linear tanpa mempertimbangkan struktur temporal sinyal. Keterbatasan ini mendorong penggunaan metode pembelajaran mendalam yang mampu mengekstraksi fitur spasial dan temporal secara simultan (Ye dkk., 2021).

Ditinjau dari teori fisika instrumentasi, interaksi senyawa gas pada permukaan semikonduktor memicu fenomena kinetika adsorpsi dan desorpsi. Rangkaian pertukaran elektron ini tidak terjadi secara seketika, melainkan merambat membentuk kurva fase transien hingga mencapai titik jenuh (*saturation*) spesifik yang terekam sebagai matriks deret waktu atau *time-series* (Freddi dkk., 2023). Untuk mengekstraksi matriks dinamis tersebut, pendekatan *Deep Learning* seperti *1-Dimensional Convolutional Neural Network* (1D-CNN) sempat diusulkan. Akan tetapi, terdapat celah penelitian (*research gap*) yang krusial: 1D-CNN mengekstraksi deret waktu hanya sebagai bentuk geometri spasial yang statis. Sifat invariansi waktu (*time-invariance*) ini menyebabkan arsitektur tersebut mengalami "kebutaan temporal". Akibatnya, filter konvolusi sering kali terkecoh oleh kebisingan sinyal dan gagal membedakan kemiringan kurva antara gelatin sapi dan ikan, sehingga akurasi klasifikasinya tertahan di angka yang rendah.

Beberapa penelitian terdahulu telah berupaya mengatasi kelemahan ini. Kang et al. (2022) mengandalkan arsitektur CNN murni yang efisien namun tetap

mengabaikan urutan waktu transien gas. Di sisi lain, Pan et al. (2019) dan Zhou & Liu (2021) mencoba menyatukan ekstraksi fitur spasial (CNN) dan temporal (RNN/LSTM) ke dalam sebuah arsitektur hibrida. Meskipun pendekatan hibrida mampu menaikkan akurasi, penggabungan dua arsitektur tersebut memicu pembengkakan jumlah parameter komputasi secara drastis. Pada implementasi lingkungan mikrokontroler (*embedded system*), ledakan parameter ini akan menguras kapasitas *Static Random-Access Memory* (SRAM) instrumen dan berisiko tinggi memicu kegagalan eksekusi atau *Out of Memory* (OOM) (Banbury dkk., 2021; Kiranyaz dkk., 2021). Hal ini secara langsung menggugurkan syarat algoritma ringan (*lightweight*) yang diwajibkan untuk perangkat *Electronic Nose* portabel.

Oleh karena itu, penelitian ini secara tegas tidak menggabungkan arsitektur spasial dan temporal menjadi sistem hibrida. Penelitian ini difokuskan murni untuk melakukan komparasi secara berhadapan-hadapan (*head-to-head*) antara model 1D-CNN melawan model sekuensial tunggal, yakni *Gated Recurrent Unit* (GRU). Struktur gerbang GRU dinilai lebih sederhana namun tetap tangguh dalam mempertahankan dependensi temporal jangka panjang (Lynn dkk., 2019). Melalui mekanisme *update gate* dan *reset gate*, sel memori GRU mampu memodelkan dinamika sinyal berbasis waktu secara berurutan, yang terbukti efektif dalam merepresentasikan perubahan konsentrasi gas pada data sensor yang bersifat non-linear dan dinamis (Wang dkk., 2020). Kemampuan GRU dalam menangkap fluktuasi transien hingga fase mendekati saturasi juga ditunjukkan pada pemodelan laju produksi gas, sehingga sangat relevan untuk merepresentasikan kinetika adsorpsi tanpa menghancurkan struktur aslinya (Fataliyev dkk., 2026). Di samping itu, pengompresan dependensi waktu ini memungkinkan GRU untuk meniadakan lapisan *Flattening* yang membebani jaringan 1D-CNN, sehingga dapat mereduksi eksekusi komputasi secara ekstrem menjadi model yang sangat ringan (*lightweight*). Dengan tambahan regularisasi *Dropout*, arsitektur ini dihipotesiskan mampu bertahan dari fenomena hafal buta (*overfitting*) pada pengolahan data berskala kecil (Md Dzahir & Chia, 2026).

Berdasarkan urgensi untuk mengatasi masalah tumpang tindih sinyal sensor secara akurat sekaligus memenuhi limitasi memori mikrokontroler, penelitian komparatif ini menjadi sangat penting untuk dilakukan. Pengujian akan difokuskan untuk membandingkan secara komprehensif performa ekstraksi fitur spasial (1D-CNN) melawan fitur temporal (GRU) pada data transien sensor. Hasil analisis rekayasa komputasi ini diharapkan dapat menetapkan arsitektur paling optimal dan ringan (*lightweight*) yang kelak siap ditanamkan pada perangkat hidung elektronik portabel guna mendukung percepatan standardisasi autentikasi halal di sektor industri nasional.

1.2 Tujuan Penelitian

Selaras dengan rumusan masalah di atas, tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Membandingkan kinerja antara arsitektur *lightweight* 1D-CNN dan GRU dalam mengklasifikasikan spesies gelatin (sapi, babi, ikan) berdasarkan metrik akurasi, presisi, *recall*, *f1-score* dan fungsi kerugian (*loss*).
2. Mengevaluasi ketangguhan arsitektur 1D-CNN dan GRU dalam mengatasi fenomena sensitivitas silang (*cross-sensitivity*) berupa tumpang tindih pola derau sinyal antara gelatin sapi dan ikan.
3. Menganalisis tingkat efisiensi beban komputasi dari kedua arsitektur berdasarkan total jumlah parameter jaringan guna menentukan model yang paling optimal dan memenuhi kriteria ringan (*lightweight*) untuk diintegrasikan pada mikrokontroler.

1.3 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini, yaitu:

1. Manfaat Teoritis

Secara teoritis, penelitian ini diharapkan dapat memberikan bukti empiris mengenai keandalan arsitektur sekuensial GRU dalam merekam kronologi transien kinetika adsorpsi-desorpsi gas. Selain itu, riset ini berkontribusi

memperkaya literatur metode komparasi komputasi, khususnya dalam membuktikan keunggulan ekstraksi fitur temporal melawan fitur spasial 1D-CNN untuk mengatasi masalah sensitivitas silang (*cross-sensitivity*) pada larik sensor semikonduktor.

2. Manfaat Praktis

Secara praktis, hasil rekayasa komputasi ini dapat menjadi acuan teknis dalam merancang arsitektur kecerdasan buatan tepi (*Edge AI/TinyML*) yang ringan (*lightweight*) tanpa mendegradasi akurasi sistem. Model berparameter rendah yang dihasilkan dapat menjadi cetak biru (*blueprint*) algoritma cerdas yang siap diintegrasikan langsung ke dalam ruang memori SRAM mikrokontroler perangkat *Electronic Nose* portabel untuk skrining cepat autentikasi halal gelatin di sektor industri.