

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pengelolaan limbah radioaktif, khususnya *Disused Sealed Radioactive Sources* (DSRS), menjadi salah satu isu strategis dalam bidang keselamatan nuklir di Indonesia. Berdasarkan data Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN), hingga 2022 terdapat lebih dari 10.000 sumber radioaktif tersegel yang terdaftar di Indonesia. Sebagian di antaranya telah habis masa pakai (DSRS), namun masih memiliki aktivitas radioaktif yang signifikan sehingga berpotensi menimbulkan risiko bagi manusia dan lingkungan bila tidak dikelola dengan baik [1].

Pengelolaan DSRS tidak hanya mencakup aspek teknis penyimpanan atau pemrosesan fisik, tetapi juga menuntut tersedianya informasi yang akurat, cepat, dan mudah dipahami oleh berbagai pihak, mulai dari regulator, teknisi, hingga masyarakat awam. Dalam dokumen *International Atomic Energy Agency* (IAEA), disebutkan bahwa keterbatasan akses terhadap informasi teknis menjadi salah satu hambatan utama dalam pengelolaan limbah radioaktif secara aman dan bertanggung jawab [2].

Seiring dengan perkembangan teknologi kecerdasan buatan, khususnya *Large Language Models* (LLM), muncul peluang baru untuk memfasilitasi akses informasi teknis melalui antarmuka interaktif seperti chatbot [3]. Model-model bahasa besar seperti GPT-4 [4] atau LLaMA 3.1 [5] menunjukkan kemampuan luar biasa dalam menghasilkan teks yang koheren dan mampu menjawab pertanyaan di berbagai domain. Namun, penelitian menunjukkan bahwa LLM standar sering memberikan jawaban yang terlalu umum, tidak akurat, atau bahkan mengalami hallucination ketika

dihadapkan pada pertanyaan spesifik di domain teknis seperti kedokteran, hukum, atau nuklir [6], [7].

Untuk mengatasi keterbatasan ini, pendekatan *Retrieval-Augmented Generation* (RAG) diperkenalkan. RAG mengombinasikan dua proses, yaitu *retrieval* (penelusuran dokumen relevan) dan *generation* (pembuatan jawaban) dalam satu pipeline. Dengan cara ini, LLM tidak hanya mengandalkan memorinya sendiri, tetapi juga dapat mengakses dokumen eksternal sebagai landasan jawaban, sehingga menghasilkan respons yang lebih akurat dan kontekstual [8]. Dalam laporan [9], disarankan bahwa penerapan sistem cerdas berbasis dokumen (document-based AI systems) dapat menjadi solusi penting untuk membantu pengambilan keputusan di bidang nuklir.

Hingga saat ini, belum terdapat penelitian yang secara khusus mengembangkan chatbot berbasis RAG untuk mendukung pengelolaan DSRS di Indonesia. Sebagian besar aplikasi RAG masih terbatas pada domain umum atau sektor bisnis, misalnya layanan pelanggan, pencarian hukum, dan kesehatan [10], [11]. Selain itu, penelitian yang memanfaatkan kombinasi model lokal (seperti Ollama) dan layanan cloud model API (seperti *OpenAI*) juga belum banyak diimplementasikan secara spesifik pada sektor strategis seperti pengelolaan limbah radioaktif [12].

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan chatbot cerdas berbasis LLM dengan pendekatan RAG yang mampu memberikan jawaban teknis terkait pengelolaan DSRS di Indonesia. Sistem akan diuji untuk mengukur keakuratan respons, terutama dalam menjawab pertanyaan spesifik seputar klasifikasi limbah, nilai D radionuklida, dan prosedur pengelolaan. Dengan adanya sistem ini, diharapkan dapat membantu meningkatkan transfer pengetahuan dan

mendukung pengambilan keputusan di sektor pengelolaan limbah radioaktif secara lebih efisien dan adaptif.

1.2. Identifikasi Masalah

Melalui pemahaman mendalam terhadap konteks permasalahan yang telah diuraikan dalam latar belakang, dapat disadari bahwa tantangan dalam pengelolaan DSRS tidak hanya berkutat pada aspek teknis semata, namun juga melibatkan kesenjangan informasi dan keterbatasan teknologi yang digunakan dalam mendukung proses pengambilan keputusan. Dalam konteks ini, teknologi kecerdasan buatan yang berkembang pesat, seperti LLM dan RAG, perlu diadaptasi dan dievaluasi efektivitasnya secara kontekstual di lingkungan lokal Indonesia. Oleh karena itu, identifikasi masalah dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut :

1. Model LLM generatif sering kali kurang akurat dalam memberikan jawaban teknis di bidang pengelolaan DSRS karena tidak memiliki akses langsung ke dokumen atau regulasi terkait.
2. Belum terdapat implementasi chatbot berbasis RAG yang dirancang khusus untuk membantu proses klasifikasi, prosedur, atau pemahaman teknis terkait pengelolaan DSRS di Indonesia.
3. Integrasi antara model lokal (misalnya *Ollama*) dan model berbasis cloud (misalnya *OpenAI*) dalam satu sistem chatbot belum banyak diteliti untuk aplikasi di sektor pengelolaan limbah radioaktif.
4. Antarmuka pengguna untuk mengeksplorasi chatbot berbasis konteks dokumen teknis masih terbatas, terutama dalam bidang nuklir.

1.3. Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah yang telah dipaparkan, maka diperlukan perumusan masalah yang lebih terfokus agar dapat dijadikan pijakan dalam merancang solusi yang tepat. Rumusan ini disusun untuk menjawab berbagai tantangan teknis dan implementatif yang timbul dalam pengembangan chatbot cerdas berbasis dokumen di bidang pengelolaan DSRS. Dengan mempertimbangkan kompleksitas domain dan keterbatasan teknologi yang ada, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana merancang chatbot berbasis LLM dan RAG yang mampu memahami serta menjawab pertanyaan teknis terkait pengelolaan DSRS di Indonesia ?
2. Bagaimana perbandingan performa chatbot berbasis RAG dengan LLM standar dalam hal relevansi dan keakuratan jawaban terhadap topik DSRS ?
3. Bagaimana integrasi antara model lokal (*Ollama*) dan model cloud (OpenAI) dapat dioptimalkan dalam pengembangan chatbot berbasis dokumen teknis di sektor pengelolaan limbah radioaktif ?

1.4. Tujuan Penelitian

Agar arah dan hasil dari penelitian ini menjadi lebih terstruktur dan terukur, maka ditetapkan sejumlah tujuan yang ingin dicapai selama proses perancangan, implementasi, dan evaluasi sistem. Tujuan-tujuan ini disusun berdasarkan permasalahan yang telah dirumuskan, sekaligus sebagai kontribusi terhadap pengembangan solusi teknologi dalam konteks sektor strategis nasional. Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu :

1. Mengembangkan prototipe chatbot berbasis LLM yang mampu memberikan jawaban teknis dan kontekstual terkait pengelolaan DSRS dengan pendekatan RAG.

2. Membandingkan kinerja chatbot berbasis RAG dengan LLM standar dalam hal akurasi jawaban terhadap pertanyaan spesifik di bidang DSRS.
3. Membangun sistem integrasi antara model lokal (*Ollama*) dan model berbasis cloud (OpenAI) dalam satu platform chatbot untuk sektor pengelolaan limbah radioaktif.
4. Memberikan kontribusi keilmuan sebagai literatur awal penerapan RAG di sektor nuklir Indonesia.
5. Mendukung penyebaran pengetahuan teknis DSRS melalui antarmuka chatbot yang mudah digunakan oleh berbagai pihak, mulai dari regulator hingga masyarakat umum.
6. Menyediakan antarmuka eksploratif (OpenWebUI) bagi pengguna untuk mengakses chatbot dan mengevaluasi kualitas jawaban berdasarkan dokumen yang telah ditentukan.

1.5. Ruang Lingkup

Supaya penelitian ini berjalan secara terarah dan tidak melebar dari sasaran utama, maka ruang lingkup ditentukan dengan mempertimbangkan aspek teknis, sumber daya, serta batasan implementasi sistem yang relevan. Pembatasan ruang lingkup juga bertujuan untuk memastikan bahwa proses pengembangan dan pengujian dapat dilakukan secara mendalam, namun tetap fokus pada tujuan penelitian. Adapun ruang lingkup dalam penelitian ini meliputi :

1. Pengembangan sistem chatbot berbasis LLM dengan pendekatan RAG untuk konteks pengelolaan DSRS di Indonesia.
2. Data yang digunakan berupa dokumen teknis publik, seperti dokumen IAEA, regulasi BAPETEN, serta dokumen teknis radionuklida.

3. Penelitian difokuskan pada aspek pengolahan teks (Natural Language Processing) tanpa mencakup pemrosesan data sensor fisik atau pemodelan radiasi secara numerik.
4. Antarmuka yang digunakan untuk pengujian adalah OpenWebUI sebagai platform interaksi pengguna dengan chatbot.

