

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan seluruh rangkaian kegiatan penelitian yang mencakup studi literatur, perancangan sistem, pemilihan dan evaluasi model Large Language Model (LLM), serta integrasi metode Retrieval-Augmented Generation (RAG), penelitian ini telah berhasil mencapai tujuannya dalam merancang dan membangun sistem chatbot cerdas yang relevan untuk mendukung pengelolaan *Disused Sealed Radioactive Sources* (DSRS). Kesimpulan dari penelitian ini dapat dirangkum sebagai berikut :

1. Perancangan sistem *DSRSafe-Bot* telah berhasil dilakukan dengan mengintegrasikan pendekatan LLM dan RAG yang mampu memahami konteks pengelolaan teknis DSRS di Indonesia. Sistem ini secara efektif menggabungkan data dari dokumen klasifikasi IAEA, nilai D per radionuklida, dan simulasi peluruhan aktivitas radionuklida untuk menghasilkan respons yang sesuai dan tepat sasaran terhadap pertanyaan pengguna .
2. Evaluasi performa chatbot menunjukkan bahwa penerapan RAG memberikan dampak signifikan dalam peningkatan kualitas jawaban model. Model GPT o1 - *Deep Thinking - With RAG* menunjukkan hasil terbaik dengan skor *Cosine Similarity* sebesar 0.9026 dan *BERTScore F1* sebesar 0.8632, menunjukkan bahwa konteks dokumen teknis yang diberikan melalui RAG mampu secara nyata meningkatkan akurasi dan relevansi jawaban dibandingkan model-model tanpa konteks.
3. Penggabungan antara model lokal (*Ollama*) dan model cloud (OpenAI) telah berhasil dilakukan dalam satu antarmuka terpadu melalui OpenWebUI,

memberikan fleksibilitas dalam penggunaan berdasarkan kebutuhan dan ketersediaan sumber daya. Model lokal dapat digunakan secara offline dan bersifat independen, sedangkan model cloud memberikan kemudahan integrasi dan kecepatan inferensi yang efisien.

4. Meskipun sistem DSRSafe-Bot telah menunjukkan performa yang baik, masih ditemukan indikasi hallucination pada tahap simulasi *deployment*, di mana chatbot sesekali menghasilkan respons di luar konteks teknis DSRS. Hal ini mengindikasikan perlunya *fine-tuning* lanjutan dan *retraining* periodik agar model dapat lebih stabil dan akurat dalam domain DSRS.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan chatbot berbasis LLM dan RAG memiliki potensi yang besar dalam mendukung digitalisasi sistem informasi teknis, khususnya dalam pengelolaan dan pemanfaatan kembali limbah radioaktif jenis DSRS di Indonesia. Sistem *DSRSafe-Bot* yang dikembangkan dapat menjadi fondasi awal bagi pengembangan solusi berbasis AI yang lebih cerdas, kontekstual, dan adaptif ke depannya.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil evaluasi sistem DSRSafe-Bot yang telah dikembangkan, terdapat sejumlah peluang pengembangan lebih lanjut baik dari sisi pengguna maupun dari aspek teknis model yang digunakan. Beberapa saran berikut diajukan sebagai bahan pertimbangan untuk penelitian lanjutan atau peningkatan sistem chatbot di masa mendatang :

1. Pelibatan Ahli Nuklir untuk Validasi Teknis

Penelitian lanjutan disarankan melibatkan ahli nuklir dalam proses pengujian untuk memverifikasi keakuratan teknis jawaban chatbot, sehingga hasilnya lebih dapat dipercaya dan sesuai dengan standar keselamatan pengelolaan DSRS.

2. Fine-Tuning LLM dengan Korpus DSRS

Perlu dilakukan *fine-tuning* terhadap model LLM menggunakan dokumen DSRS seperti regulasi IAEA dan laporan teknis BRIN agar model lebih memahami istilah dan konteks nuklir serta mengurangi potensi *hallucination*.

3. Integrasi Reinforcement Learning from Human Feedback (RLHF)

Sistem dapat ditingkatkan dengan menerapkan RLHF agar chatbot dapat belajar dari umpan balik pengguna dan memperbaiki kualitas jawaban berdasarkan evaluasi nyata dari pakar atau pengguna akhir.

4. Pelatihan Ulang Model Secara Berkala

Model perlu dilatih ulang secara periodik agar performanya tetap stabil dan adaptif terhadap pembaruan data serta perubahan konteks informasi terkait pengelolaan DSRS.

5. Pengembangan Fitur Evaluasi dan Pengayaan Basis Data

Disarankan menambahkan fitur evaluasi otomatis berbasis *semantic similarity* serta memungkinkan pengguna memperkaya *knowledge base* dengan dokumen baru agar sistem selalu relevan dan up to date.