

Perancangan Antarmuka dan Alur Kerja *Dashboard Web* untuk Manajemen Data Survei Frekuensi Radio Multi-Lokasi

DOI: <http://dx.doi.org/10.35889/jutisi.v15i4.3837>

Creative Commons License 4.0 (CC BY – NC)

M. Habiburrahman¹, Ade Silvia Handayani^{2*}, Suroso³, Ciksadan⁴

Teknik Telekomunikasi, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Indonesia

*e-mail Corresponding Author: ade_silvia@polsri.ac.id

Abstract

Manual radio frequency survey documentation is prone to procedural inconsistency and inefficiency among team members, requiring a structured digital interface. This study aims to design and evaluate the user interface (UI) and workflow of a web-based dashboard to support structured and efficient radio frequency survey documentation. The method used is a case study comprising user needs analysis, wireframe design, Flask-based prototype development, and a usability walkthrough involving five survey team members. The developed system includes survey location management, documentation of three measurement sessions per location, structured file upload, and job status monitoring via visual indicators. Evaluation results show an average System Usability Scale (SUS) score of 78.5, categorized as Good, with average task completion times of 42 seconds for adding a new location and 38 seconds for uploading a session recording. These findings indicate that guided interfaces and standardized workflows improve documentation efficiency and accelerate the adaptation of new users.

Keywords: *Web Dashboard; User Interface; Workflow; Usability; Radio Frequency Survey*

Abstrak

Dokumentasi survei frekuensi radio secara manual rentan terhadap variasi prosedur antar anggota tim dan kurang efisien, sehingga diperlukan antarmuka digital yang terstruktur untuk mendukung proses tersebut. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengevaluasi antarmuka pengguna (UI) serta *workflow dashboard* berbasis *web* guna mendukung dokumentasi survei frekuensi radio secara terstruktur dan efisien. Metode yang digunakan adalah studi kasus meliputi analisis kebutuhan pengguna, perancangan *wireframe*, pengembangan prototipe berbasis *Flask*, serta evaluasi keterpakaian melalui *usability walkthrough* terhadap lima anggota tim survei. Sistem yang dikembangkan mencakup pengelolaan lokasi survei, dokumentasi tiga sesi pengukuran per lokasi, *upload* berkas terstruktur, dan pemantauan status pekerjaan melalui indikator visual. Hasil evaluasi menunjukkan skor *System Usability Scale (SUS)* rata-rata 78,5 (kategori *Good*), dengan rata-rata waktu penyelesaian tugas 42 detik untuk menambahkan lokasi baru dan 38 detik untuk mengunggah rekaman sesi. Temuan ini juga menunjukkan bahwa antarmuka terpandu dan alur kerja terstandarisasi meningkatkan efisiensi dokumentasi serta mempercepat adaptasi pengguna baru.

Kata kunci: *Dashboard Web; Antarmuka Pengguna; Alur Kerja; Usability; Survei Frekuensi Radio*

1. Pendahuluan

Kegiatan survei frekuensi radio lapangan merupakan bagian penting dalam pemantauan spektrum, mulai dari manajemen alokasi frekuensi, deteksi interferensi sinyal, hingga penegakan regulasi telekomunikasi. Kualitas hasil survei sangat bergantung pada konsistensi dan kelengkapan dokumentasi data lapangan, mengingat setiap lokasi pengukuran umumnya memerlukan beberapa tahap pengambilan data sebelum dinyatakan selesai. Ketepatan

dokumentasi, mencakup data spektrum, koordinat lokasi, waktu pengambilan data, parameter perangkat, dan dokumentasi pendukung, menjadi krusial karena kesalahan atau inkonsistensi pada tahap ini berdampak langsung terhadap validitas analisis dan keputusan yang didasarkan padanya [1]. Perkembangan teknologi web, *edge computing*, dan *cloud computing* dalam satu dekade terakhir membuka peluang besar untuk mentransformasi dokumentasi survei manual menjadi sistem digital yang lebih terstruktur, sehingga penelitian mengenai model antarmuka dashboard yang mendukung proses tersebut menjadi relevan untuk dikaji lebih lanjut [2].

Objek kajian penelitian ini adalah manajemen data survei frekuensi radio menggunakan perangkat RTL-SDR dan Raspberry Pi sebagai unit pemroses edge, dengan GQRX sebagai perangkat lunak monitoring sinyal [3]. Proses ini melibatkan integrasi berbagai perangkat, sumber data, dan mekanisme sinkronisasi yang harus tetap konsisten meskipun konektivitas internet di lapangan tidak selalu stabil, sebagaimana ditunjukkan pada kajian arsitektur monitoring IoT umum yang menekankan konektivitas perangkat dan pusat data namun belum menyentuh desain antarmuka pengguna secara spesifik [4]. Tanpa antarmuka yang memandu pengguna melalui tahapan kerja yang baku, anggota tim survei cenderung mendokumentasikan data dengan format dan urutan berbeda-beda, menyulitkan proses verifikasi, integrasi, dan agregasi data pada tahap analisis berikutnya [5]. Penerapan REST API sebagai mekanisme integrasi data antarperangkat dan layanan cloud turut memerlukan antarmuka yang menjaga konsistensi input, penyimpanan, dan sinkronisasi data agar tidak menimbulkan kesalahan operasional [6]. Tanpa alur kerja (*workflow*) bertahap yang terstruktur dengan indikator progres yang jelas, pengguna berpotensi melewati tahapan tertentu atau menghasilkan dokumentasi yang tidak konsisten antarlokasi maupun antaranggota tim, sehingga menghambat proses analisis data pada tahap selanjutnya [7].

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji model antarmuka dashboard untuk monitoring dan manajemen data yang relevan dengan konteks penelitian ini. Assad [8] meneliti dashboard berbasis web untuk monitoring spektrum radio, berfokus pada visualisasi data spektrum *real-time* melalui antarmuka grafis, namun belum membahas alur kerja bertahap untuk manajemen sesi pengambilan data survei di lapangan. Montaghi [9] meneliti dashboard visualisasi spektrum nirkabel *real-time* yang menekankan representasi visual sinyal secara langsung, tetapi tidak mengkaji struktur navigasi maupun indikator status penyelesaian pekerjaan untuk dokumentasi multi-tahap. Gorden dan Oluwaseun [10] meneliti dashboard monitoring web *real-time* pada domain pemantauan pandemi yang memudahkan akses informasi jarak jauh, namun tidak diarahkan pada manajemen data survei lapangan maupun sinkronisasi data edge-cloud. Sementara itu, Panayides [11] dan Bacci dan Scali [12] meneliti penerapan metode User-Centered Design dalam perancangan ulang antarmuka aplikasi dan situs web yang menekankan pelibatan pengguna pada setiap tahap perancangan, namun diterapkan pada domain aplikasi umum dan belum menyentuh konteks dashboard monitoring frekuensi radio berbasis hardware edge computing. Dari kelima kajian tersebut, teridentifikasi gap penelitian yang jelas, yaitu belum adanya model antarmuka dashboard yang secara khusus mengintegrasikan visualisasi monitoring spektrum [13], alur kerja bertahap dengan indikator status visual untuk manajemen sesi survei multi-lokasi, prinsip perancangan berbasis UCD, dan mekanisme sinkronisasi data edge-cloud dalam satu model dashboard manajemen data survei yang tervalidasi secara empiris melalui evaluasi *usability* [14].

Berdasarkan gap tersebut, penelitian ini mengusulkan model antarmuka dashboard manajemen data survei frekuensi radio yang mengintegrasikan alur kerja bertahap, indikator status visual, dan sinkronisasi data berbasis REST API pada arsitektur Edge-Cloud. Konsep ini didukung tiga landasan teoretis yang saling melengkapi: pendekatan User-Centered Design (UCD), yang terbukti secara empiris meningkatkan penerimaan pengguna ketika kebutuhan dan konteks penggunaan menjadi prioritas utama perancangan; konsep *staged workflow*, yang menurut penelitian sebelumnya efektif meningkatkan konsistensi dan mengurangi kesalahan pada aplikasi pengumpulan data lapangan melalui pembagian proses kompleks menjadi tahapan terstruktur dengan indikator progres berbasis warna; dan evaluasi keterpakaian menggunakan System Usability Scale (SUS), yang validitas dan reliabilitasnya telah teruji luas untuk mengukur penerimaan pengguna secara cepat dan andal [15]. Sejauh penelusuran penulis terhadap *state of the art* pada bidang ini, belum ditemukan penelitian yang mengintegrasikan ketiga landasan tersebut (UCD, *staged workflow*, dan evaluasi SUS) secara bersamaan dalam satu model dashboard manajemen data survei frekuensi radio berbasis hardware terjangkau (RTL-SDR dan Raspberry Pi). Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi ketiga konsep tersebut ke dalam

satu model antarmuka yang divalidasi secara empiris melalui pengujian *usability*, sehingga mengisi kesenjangan pada kajian terdahulu sekaligus memberikan bukti kuantitatif mengenai efektivitas kombinasi ketiga pendekatan tersebut pada konteks monitoring frekuensi radio [16].

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus dengan metode pengembangan iteratif yang terdiri atas empat tahap: analisis kebutuhan pengguna, perancangan wireframe dan alur navigasi, implementasi prototipe fungsional, serta evaluasi keterpakaiannya, guna menghasilkan dashboard yang sesuai dengan kebutuhan dokumentasi survei frekuensi radio di lapangan. Subjek penelitian adalah dashboard web monitoring frekuensi radio yang dikembangkan menggunakan *framework* Flask dan dijalankan pada perangkat Raspberry Pi sebagai server lapangan, dirancang untuk mendukung pengelolaan lokasi survei, pencatatan sesi pengukuran, unggah berkas hasil survei, dan pemantauan progres pekerjaan melalui antarmuka yang terstruktur.

2.1 Analisis Kebutuhan Pengguna

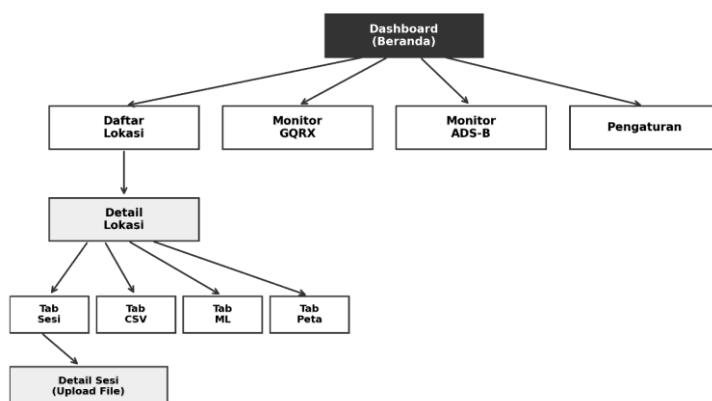
Analisis kebutuhan dilakukan melalui wawancara semi-terstruktur terhadap lima calon pengguna (anggota tim survei frekuensi radio), berdurasi rata-rata 20–30 menit per partisipan, dengan tiga fokus pertanyaan: alur kerja survei di lapangan, kendala dokumentasi data, dan harapan terhadap sistem pengganti pencatatan manual. Hasil wawancara ditranskripsi dan dianalisis secara tematik untuk mengidentifikasi pola kebutuhan yang berulang. Temuan utama menunjukkan bahwa pengguna memerlukan indikator visual status sesi, mekanisme unggah berkas yang sederhana, serta akses cepat terhadap informasi lokasi dan hasil pengukuran, yang menjadi dasar perancangan struktur antarmuka dan alur kerja dashboard.

Berdasarkan analisis tersebut, kebutuhan pengguna dikelompokkan menjadi fungsional dan non-fungsional. Kebutuhan fungsional meliputi: (F1) pengelolaan titik lokasi survei beserta koordinat GPS; (F2) pencatatan tiga sesi pengukuran per lokasi dengan status independen (menunggu, berjalan, selesai); (F3) pengunggahan berkas hasil pengukuran berupa screenshot GQRX (JPG/PNG) dan rekaman audio WAV per sesi; (F4) pemantauan status pekerjaan melalui indikator visual berbasis warna yang konsisten; (F5) pengelolaan konfigurasi sistem dan status sinkronisasi cloud; serta (F6) sinkronisasi metadata otomatis di latar belakang saat koneksi tersedia. Kebutuhan non-fungsional mencakup kemudahan penggunaan tanpa latar belakang teknis mendalam, waktu respons yang cepat pada perangkat Raspberry Pi, serta toleransi terhadap konektivitas jaringan yang tidak stabil. Pemetaan ini menjadi acuan penentuan struktur halaman, hierarki navigasi, dan komponen antarmuka.

2.2 Perancangan Struktur Navigasi dan Alur Kerja

Berdasarkan hasil analisis kebutuhan, dirancang struktur navigasi yang terdiri atas tujuh halaman utama, yaitu Dashboard, Daftar Lokasi, Detail Lokasi, Detail Sesi, Monitor GQRX, Monitor ADS-B, dan Pengaturan. Struktur ini dirancang untuk mendukung pengelolaan data survei frekuensi radio secara terpusat melalui satu antarmuka terintegrasi, dengan setiap halaman memiliki fungsi berbeda namun saling terhubung sehingga pengguna dapat berpindah antarfitur tanpa mengulangi proses pencarian data atau kembali ke halaman awal.

Penentuan tujuh halaman tersebut didasarkan pada pemetaan kebutuhan fungsional pada tahap analisis kebutuhan, di mana setiap kebutuhan pengguna dipetakan menjadi satu unit fungsi antarmuka agar tidak terjadi tumpang tindih fitur. Halaman Dashboard mewakili kebutuhan memperoleh gambaran umum kondisi survei secara cepat; Daftar Lokasi dan Detail Lokasi mewakili kebutuhan pengelolaan titik survei yang berulang pada setiap kegiatan lapangan; Detail Sesi dipisahkan dari Detail Lokasi karena mewakili kebutuhan pencatatan yang lebih rinci pada tingkat sesi pengukuran; sedangkan Monitor GQRX dan Monitor ADS-B dipisahkan satu samalain karena merepresentasikan dua jenis pemantauan dengan sifat data dan mekanisme akuisisi yang berbeda.



Gambar 1. Diagram Alur Navigasi dan Hierarki Halaman Dashboard

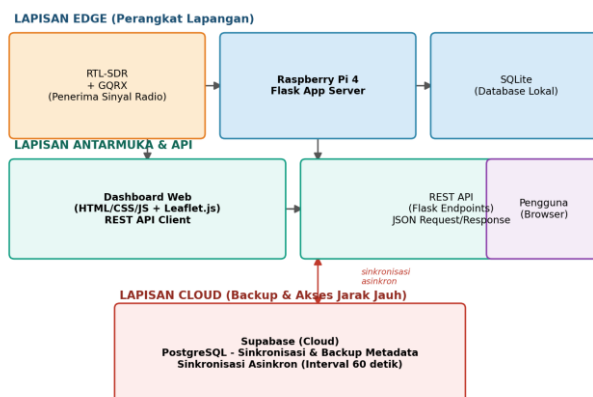
Pola navigasi yang dipilih adalah sidebar tetap (*persistent sidebar*) yang selalu tampil di seluruh halaman, bukan navigasi bertumpuk (*nested menu*). Pemilihan ini didasarkan pada kebutuhan pengguna lapangan yang sering berpindah antarfitur secara bergantian, misalnya antara peta lokasi dan unggah berkas sesi, sehingga dengan sidebar tetap seluruh halaman utama dapat dicapai dalam satu klik dari mana pun. Struktur navigasi juga dibatasi maksimum tiga tingkat kedalaman, yaitu halaman utama, daftar, lalu detail, untuk menjaga efisiensi navigasi yang menjadi salah satu fokus evaluasi keterpakaian penelitian ini.

Gambar 1 menunjukkan diagram alur navigasi dan hierarki halaman yang dikembangkan. Halaman Dashboard berfungsi sebagai pusat navigasi menuju Daftar Lokasi, Monitor GQRX, Monitor ADS-B, dan Pengaturan. Dari Daftar Lokasi, pengguna memilih satu lokasi untuk membuka halaman Detail Lokasi yang terbagi ke dalam beberapa tab (Sesi, CSV, ML, Peta) guna mengurangi kepadatan informasi pada satu halaman. Melalui Tab Sesi, pengguna mengakses halaman Detail Sesi untuk mengunggah berkas dan melengkapi dokumentasi tiap sesi pengukuran.

Alur kerja inti mengikuti pola bertahap: pengguna membuat titik lokasi survei (nama, alamat, koordinat GPS) sebelum mengelola sesi pengukuran. Setelah lokasi dibuat, sistem otomatis membentuk tiga sesi dengan status awal 'menunggu', yang kemudian berubah menjadi 'berjalan' atau 'selesai' melalui indikator visual berbasis warna sesuai kebutuhan F4. Pada setiap sesi, pengguna mengunggah screenshot GQRX dan rekaman audio WAV melalui antarmuka drag-and-drop dengan progress bar real-time; berkas langsung tersimpan ke penyimpanan lokal Raspberry Pi dan dijadwalkan untuk sinkronisasi ke Supabase setiap 60 detik (F6). Pendekatan bertahap ini membantu pengguna memantau progres survei secara cepat sekaligus mengurangi risiko terlewatnya tahapan dokumentasi antarlokasi.

2.3 Perancangan Arsitektur Sistem

Selain aspek antarmuka, perancangan juga mempertimbangkan arsitektur sistem pendukung agar alur kerja yang telah dirancang dapat berjalan secara konsisten pada kondisi lapangan dengan keterbatasan konektivitas jaringan. Sistem dibangun mengikuti arsitektur tiga lapis (*three-tier architecture*), yaitu lapisan presentasi berupa antarmuka *web* yang berjalan pada peramban, lapisan logika aplikasi berupa backend Flask yang diorganisasikan dalam beberapa modul blueprint sesuai fungsi masing-masing halaman, serta lapisan data yang menggunakan basis data SQLite sebagai penyimpanan utama pada perangkat Raspberry Pi. Pemilihan SQLite sebagai penyimpanan utama secara *offline-first* bertujuan memastikan seluruh data survei tetap dapat dicatat meskipun perangkat sedang tidak terhubung ke jaringan internet.



Gambar 2. Diagram Arsitektur Sistem Edge-Cloud

Untuk mendukung kebutuhan pemantauan terpusat, sistem juga dilengkapi mekanisme sinkronisasi data ke basis data cloud (Supabase PostgreSQL) yang dijalankan melalui *background thread* pada interval waktu tertentu. Proses sinkronisasi ini dirancang agar tidak menghambat responsivitas antarmuka, karena permintaan pengguna tetap dilayani langsung oleh basis data lokal, sementara proses replikasi ke cloud berjalan secara asinkron. Komunikasi antara antarmuka, backend, dan proses sinkronisasi cloud diimplementasikan melalui REST API sehingga struktur data yang dipertukarkan bersifat konsisten dan dapat diakses oleh komponen lain di luar antarmuka *web* pada pengembangan berikutnya. Pendekatan arsitektur ini melengkapi desain antarmuka dan alur kerja yang telah dibahas sebelumnya dengan memastikan bahwa kemudahan penggunaan yang dirasakan pengguna didukung oleh mekanisme pengelolaan data yang andal pada sisi backend

Gambar 2 menyajikan diagram arsitektur sistem secara menyeluruh yang terbagi ke dalam tiga lapisan utama. Lapisan edge terdiri atas perangkat RTL-SDR yang menerima sinyal radio dan diproses melalui aplikasi GQRX, yang kemudian dikendalikan oleh Raspberry Pi 4 menjalankan server Flask serta basis data SQLite sebagai penyimpanan utama yang bersifat lokal dan tidak bergantung pada konektivitas internet. Lapisan antarmuka dan API menjembatani interaksi pengguna dengan sistem melalui dashboard *web* berbasis HTML/CSS/JavaScript yang berkomunikasi dengan backend melalui REST API dalam format JSON. Lapisan cloud memanfaatkan Supabase sebagai basis data PostgreSQL untuk sinkronisasi dan backup metadata secara asinkron pada interval 60 detik, sehingga sistem tetap dapat beroperasi penuh secara lokal meskipun koneksi internet tidak tersedia, dan secara otomatis menyinkronkan data begitu koneksi kembali pulih. Pemisahan tiga lapisan ini secara langsung mendukung kebutuhan fungsional F6 (sinkronisasi otomatis di latar belakang) yang telah diidentifikasi pada tahap analisis kebutuhan.

2.4 Perancangan Komponen Antarmuka

Komponen antarmuka dirancang dengan mempertimbangkan tiga prinsip: konsistensi visual, umpan balik langsung (*immediate feedback*), dan toleransi kesalahan (*error tolerance*). Konsistensi visual diterapkan melalui penggunaan skema warna tunggal untuk merepresentasikan status yang sama di seluruh halaman, warna hijau toska untuk status selesai, kuning untuk menunggu, dan biru untuk sedang berjalan. Umpan balik langsung diterapkan pada zona unggah berkas yang menampilkan pratinjau nama dan ukuran berkas segera setelah berkas dipilih, sebelum proses unggah dimulai. Toleransi kesalahan diterapkan melalui dialog konfirmasi pada setiap aksi penghapusan data serta validasi format berkas di sisi klien sebelum permintaan dikirim ke server.

2.5 Implementasi Prototipe

Prototipe fungsional diimplementasikan menggunakan kombinasi HTML, CSS, dan JavaScript murni tanpa kerangka kerja frontend tambahan, dengan tujuan meminimalkan beban pemrosesan pada perangkat Raspberry Pi yang memiliki sumber daya terbatas. Tabel 1 merangkum spesifikasi teknologi yang digunakan dalam implementasi prototipe.

Tabel 1. Spesifikasi Teknologi Implementasi Prototipe

Komponen	Teknologi yang Digunakan
Server backend	Python 3.11, Flask 3.0
Antarmuka pengguna	HTML5, CSS3, JavaScript (Vanilla)
Visualisasi peta	Leaflet.js 1.9.4
Perangkat uji	Raspberry Pi 4 Model B
Resolusi uji	1366x768 (laptop)

2.6 Prosedur Evaluasi *Usability*

Evaluasi keterpakaian dilakukan melalui sesi pengujian langsung terhadap lima pengguna yang merupakan anggota tim survei frekuensi radio dan belum pernah menggunakan aplikasi sebelumnya. Pengujian ini bertujuan untuk menilai sejauh mana antarmuka dan alur kerja yang dirancang dapat dipahami serta digunakan secara efektif oleh pengguna baru tanpa memerlukan pelatihan khusus. Setiap peserta diberikan serangkaian skenario penggunaan yang merepresentasikan aktivitas survei frekuensi radio di lapangan.

Dalam sesi pengujian, setiap pengguna diminta menyelesaikan beberapa tugas utama yang tersedia pada aplikasi, meliputi penambahan titik lokasi survei, pengisian informasi kegiatan survei, unggah berkas hasil pengukuran, serta pemeriksaan status progres pekerjaan yang telah dilakukan. Tugas-tugas tersebut dipilih karena mewakili fungsi inti aplikasi yang paling sering digunakan dalam proses pengelolaan data survei frekuensi radio multi-lokasi. Selama pengguna berinteraksi dengan sistem, peneliti melakukan observasi untuk mengidentifikasi kendala yang muncul, seperti kesalahan navigasi, kebingungan dalam memahami fungsi menu, maupun kesulitan dalam menyelesaikan suatu tugas.

Selain observasi, waktu penyelesaian setiap tugas dan jumlah kesalahan navigasi yang terjadi juga dicatat sebagai indikator efisiensi dan kemudahan penggunaan sistem. Data tersebut digunakan untuk menilai apakah pengguna dapat menyelesaikan tugas dengan cepat dan tanpa hambatan yang berarti. Semakin singkat waktu yang dibutuhkan dan semakin sedikit kesalahan yang terjadi, maka semakin baik tingkat keterpakaian antarmuka yang dirancang.

Setelah seluruh tugas selesai dilaksanakan, pengguna diminta mengisi kuesioner *System Usability Scale* (SUS) yang terdiri atas sepuluh pernyataan dengan skala penilaian lima tingkat. Kuesioner ini digunakan untuk memperoleh umpan balik subjektif mengenai kemudahan penggunaan, kejelasan antarmuka, kenyamanan interaksi, serta tingkat kepuasan pengguna terhadap aplikasi secara keseluruhan. Hasil pengujian tugas dan skor SUS kemudian dianalisis untuk menentukan tingkat keterpakaian sistem serta mengidentifikasi aspek antarmuka yang masih memerlukan perbaikan atau penyempurnaan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Perancangan Antarmuka

Hasil perancangan menghasilkan tujuh halaman antarmuka dengan pola navigasi sidebar tetap yang konsisten untuk memudahkan pengguna berpindah antarfitur tanpa kehilangan konteks penggunaan. Struktur navigasi ini dirancang agar seluruh fungsi utama dapat diakses melalui satu menu utama yang selalu tersedia pada setiap halaman. Halaman Dashboard menampilkan ringkasan statistik, peta sebaran lokasi pengukuran, informasi jumlah lokasi yang telah disurvei, serta status perangkat dan data yang tersinkronisasi secara sekilas tanpa memerlukan navigasi tambahan. Penyajian informasi dalam bentuk kartu statistik dan visualisasi peta bertujuan untuk membantu pengguna memperoleh gambaran umum kondisi survei secara cepat. Selain itu, pengelompokan informasi berdasarkan fungsi dan tingkat kepentingan dirancang untuk mengurangi beban kognitif pengguna saat melakukan pemantauan maupun pengelolaan data survei.

Pada halaman manajemen lokasi, pengguna dapat melihat daftar titik survei yang telah dibuat beserta status penyelesaiannya. Setiap lokasi memiliki halaman detail yang menampilkan informasi survei dan tiga sesi pengukuran yang harus diselesaikan. Struktur ini dirancang mengikuti alur kerja lapangan yang umum digunakan oleh tim survei frekuensi radio, sehingga pengguna dapat memahami tahapan pekerjaan secara lebih intuitif. Pendekatan *workflow* bertahap juga memungkinkan sistem memberikan panduan visual mengenai progres pekerjaan yang telah diselesaikan maupun tugas yang masih harus dilakukan pada setiap lokasi survei.



Gambar 3. Pola Kartu Sesi dengan Indikator Status Visual Berbasis Warna

Gambar 3 menunjukkan pola kartu sesi yang merepresentasikan status pelaksanaan pengukuran pada setiap lokasi survei. Setiap kartu menampilkan status sesi melalui kombinasi warna dan teks sehingga pengguna dapat memperoleh informasi secara cepat tanpa membuka halaman detail. Warna hijau toska digunakan untuk sesi yang telah selesai, kuning untuk sesi yang sedang menunggu proses unggah atau penyelesaian data, dan abu-abu untuk sesi yang belum dimulai. Selain warna pada bagian header, sistem juga menampilkan ringkasan aktivitas pada masing-masing sesi sehingga kondisi terkini dapat diketahui hanya melalui tampilan kartu.

Penerapan indikator status visual berbasis warna terbukti memudahkan pengguna mengenali progres penyelesaian sesi tanpa perlu membaca label teks secara detail. Seluruh lima pengguna yang diuji mampu mengidentifikasi sesi yang telah selesai, sedang menunggu, maupun belum dimulai dalam waktu kurang dari tiga detik hanya dengan melihat warna kartu, tanpa instruksi khusus mengenai makna setiap warna. Warna juga membantu pengguna memprioritaskan pekerjaan yang harus segera diselesaikan: kartu berwarna kuning memberi sinyal masih ada aktivitas yang perlu dilakukan, sementara kartu hijau mengonfirmasi bahwa seluruh aktivitas pada sesi tersebut telah selesai. Temuan ini menunjukkan bahwa representasi visual yang konsisten mampu meningkatkan kecepatan pemahaman informasi sekaligus mendukung monitoring progres survei secara lebih efektif, terutama ketika pengguna mengelola banyak titik lokasi dan beberapa sesi pengukuran secara bersamaan.

Secara keseluruhan, hasil perancangan menunjukkan bahwa kombinasi antara navigasi yang konsisten, *workflow* bertahap, dan indikator status visual berbasis warna mampu menciptakan antarmuka yang mudah dipahami oleh pengguna baru. Pendekatan tersebut tidak hanya membantu mempercepat proses dokumentasi survei, tetapi juga meningkatkan keteraturan pengelolaan data dan mempe

3.2 Hasil Evaluasi *Usability*

Evaluasi *usability* terhadap lima pengguna menghasilkan skor *System Usability Scale* (SUS) individual yang bervariasi antara 70,0 hingga 87,5, dengan nilai rata-rata sebesar 78,5 yang termasuk dalam kategori "Good" menurut klasifikasi SUS. Hasil tersebut menunjukkan bahwa antarmuka dan alur kerja dashboard yang dikembangkan memiliki tingkat keterpakaian yang baik serta dapat diterima oleh pengguna sebagai sarana pendukung dokumentasi survei frekuensi radio. Nilai rata-rata yang berada di atas ambang batas 68 mengindikasikan bahwa sebagian besar pengguna dapat memahami fungsi sistem, menemukan fitur yang dibutuhkan, dan menyelesaikan tugas yang diberikan tanpa mengalami kesulitan yang berarti. Tabel 2 menyajikan hasil skor SUS masing-masing pengguna beserta waktu penyelesaian tugas dan jumlah kesalahan navigasi yang teridentifikasi selama proses pengujian.

Tabel 2. Hasil Evaluasi *Usability* per Pengguna

Pengguna	Skor SUS	Waktu Tambah Lokasi (detik)	Waktu Unggah Sesi (detik)	Kesalahan Navigasi
P1	82,5	38	35	0
P2	70,0	51	46	2
P3	85,0	36	32	0
P4	75,0	44	40	1
P5	87,5	34	37	0
Rata-rata	78,5	42	38	0,6

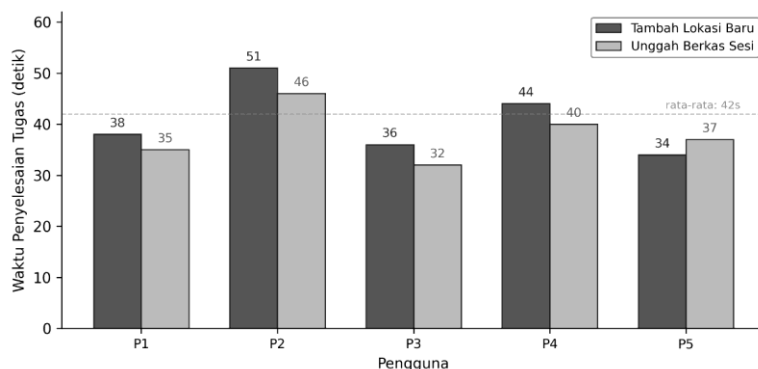
Berdasarkan hasil pengujian, pengguna P5 memperoleh skor SUS tertinggi (87,5), diikuti P3 (85,0) dan P1 (82,5), ketiganya menyelesaikan tugas dengan cepat dan tanpa kesalahan navigasi, menunjukkan tingkat *learnability* yang baik sejak penggunaan pertama. Sebaliknya, pengguna P2 memperoleh skor terendah (70,0), mengindikasikan adanya aspek antarmuka yang berpotensi membingungkan sebagian pengguna, terutama fitur yang tidak langsung terlihat pada tampilan awal.

P2 juga mencatat waktu penyelesaian tugas paling lama (51 detik menambah lokasi; 46 detik unggah berkas sesi). Berdasarkan observasi, keterlambatan ini disebabkan kesulitan menemukan tombol unggah berkas WAV yang ditempatkan di bagian bawah halaman detail sesi sehingga memerlukan scroll tambahan. Temuan ini menunjukkan pentingnya penempatan elemen antarmuka terhadap efisiensi interaksi; posisi fitur unggah berkas perlu dipindahkan ke area yang lebih terlihat atau diberi penekanan visual lebih kuat.

Analisis kesalahan navigasi menunjukkan dua kesalahan P2 dan satu kesalahan P4 seluruhnya terjadi pada proses unggah berkas sesi, akibat pengguna tidak sengaja memilih tombol "Edit Info" alih-alih "Upload File" karena kedua tombol berdekatan dan tampilannya serupa. Temuan ini menunjukkan perlunya diferensiasi visual yang lebih kuat (warna, ikon, ukuran, atau jarak antar elemen) agar fungsi tombol dapat dikenali dengan jelas. Sebaliknya, tidak ditemukan kesalahan navigasi pada tugas menambah lokasi maupun memeriksa status progres, seluruh pengguna menyelesaikannya tanpa bantuan peneliti, memperkuat bahwa *workflow* bertahap dengan indikator status visual membantu pengguna memahami urutan pekerjaan dan memenuhi tujuan penelitian untuk menyediakan antarmuka yang mudah digunakan bagi pengguna baru.

Skor SUS rata-rata ini sejalan dengan temuan penelitian sejenis pada dashboard monitoring spektrum berbasis web, yang menunjukkan penyajian informasi melalui dashboard meningkatkan penerimaan pengguna dibandingkan metode pencatatan konvensional, memperkuat bahwa struktur navigasi tetap, alur kerja bertahap, dan indikator status visual bukan sekadar preferensi desain, melainkan faktor yang secara empiris berkontribusi terhadap *usability* pada domain monitoring teknis.

3.3 Perbandingan Waktu Penyelesaian Tugas



Gambar 4. Perbandingan Waktu Penyelesaian Tugas per Pengguna

Gambar 4 menunjukkan perbandingan waktu penyelesaian dua tugas utama, yaitu menambah lokasi baru dan mengunggah berkas sesi, yang dilakukan oleh lima pengguna selama pengujian *usability*. Secara umum, seluruh pengguna mampu menyelesaikan kedua tugas dengan waktu kurang dari satu menit, menunjukkan bahwa antarmuka yang dirancang cukup mudah dipahami dan digunakan oleh pengguna yang belum pernah berinteraksi dengan sistem sebelumnya. Rata-rata waktu penyelesaian tugas menambah lokasi baru adalah 42 detik, sedangkan tugas unggah berkas sesi memerlukan rata-rata 38 detik. Hasil ini menunjukkan bahwa kedua alur kerja dapat diselesaikan secara efisien tanpa memerlukan proses pembelajaran yang panjang.

Berdasarkan grafik, pengguna P2 mencatat waktu penyelesaian paling lama pada kedua tugas, yaitu 51 detik untuk menambah lokasi baru dan 46 detik untuk mengunggah berkas sesi. Sebaliknya, pengguna P5 dan P3 menunjukkan waktu penyelesaian yang lebih cepat dibandingkan pengguna lainnya. Perbedaan waktu tersebut mengindikasikan adanya variasi

tingkat familiaritas pengguna terhadap antarmuka aplikasi berbasis *web*, meskipun seluruh partisipan berasal dari kelompok pengguna yang sama. Namun demikian, selisih waktu antar pengguna masih berada dalam rentang yang relatif kecil sehingga tidak menunjukkan adanya hambatan penggunaan yang signifikan pada sistem yang dikembangkan.

Tugas menambah lokasi baru cenderung membutuhkan waktu lebih lama dibandingkan tugas unggah berkas sesi pada sebagian besar pengguna. Hal ini disebabkan oleh adanya beberapa tahapan yang harus dilakukan secara berurutan, seperti pengisian nama lokasi, informasi deskripsi, serta proses pengambilan atau penentuan koordinat lokasi sebelum data dapat disimpan ke dalam sistem. Sebaliknya, proses unggah berkas sesi hanya melibatkan pemilihan berkas dan konfirmasi unggah sehingga memerlukan jumlah interaksi yang lebih sedikit. Meskipun demikian, pada pengguna P5 waktu unggah berkas sedikit lebih lama dibandingkan penambahan lokasi, yang kemungkinan dipengaruhi oleh waktu yang dibutuhkan untuk memahami posisi fitur unggah atau memilih berkas yang akan digunakan.

Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa struktur navigasi yang konsisten dan alur kerja bertahap yang diterapkan pada dashboard mampu membantu pengguna menyelesaikan tugas utama dengan efisien. Waktu penyelesaian yang relatif singkat pada seluruh partisipan mengindikasikan bahwa antarmuka telah mendukung aspek *learnability* dan *efficiency* yang merupakan komponen penting dalam *usability*. Dengan demikian, dashboard yang dirancang dapat membantu proses dokumentasi survei frekuensi radio secara lebih terstruktur sekaligus meminimalkan waktu yang diperlukan pengguna untuk menyelesaikan aktivitas operasional di lapangan.

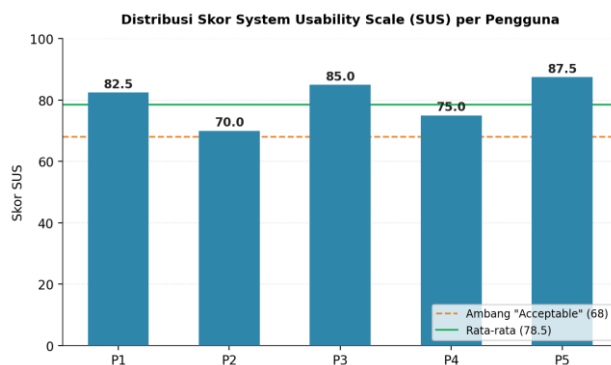
3.4 Pembahasan

Bagian ini menyajikan pembahasan mendalam terhadap temuan penelitian dengan mengaitkan hasil kuantitatif pada Tabel 2, Gambar 4, dan Gambar 5 terhadap kerangka konseptual yang mendasari perancangan sistem, membandingkannya dengan temuan penelitian terdahulu, serta mengidentifikasi implikasi teoritis dan praktis dari hasil yang diperoleh. Pembahasan disusun ke dalam enam subbagian untuk memberikan analisis yang komprehensif dan terstruktur terhadap seluruh aspek hasil penelitian.

3.4.1 Interpretasi Hasil terhadap Tujuan Penelitian

Tujuan utama penelitian ini adalah merancang dashboard *web* dengan antarmuka dan alur kerja bertahap yang dapat meningkatkan konsistensi dokumentasi survei frekuensi radio serta memiliki tingkat keterpakaian yang baik. Hasil evaluasi menunjukkan skor SUS rata-rata 78,5 yang berada dalam kategori 'Good' (68–80,3) menurut klasifikasi Bangor et al., mengindikasikan bahwa dashboard memenuhi ambang batas keterpakaian yang dapat diterima secara ilmiah. Untuk memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai sebaran skor tersebut, Gambar 5 menyajikan visualisasi skor SUS masing-masing partisipan beserta garis ambang batas 'Acceptable' pada nilai 68.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5, seluruh lima partisipan (P1–P5) mencatatkan skor di atas ambang batas 68, dengan rentang skor antara 70,0 (P2) hingga 87,5 (P5). Variasi skor tertinggi terhadap terendah sebesar 17,5 poin menunjukkan adanya perbedaan pengalaman antarpengguna yang perlu dicermati lebih lanjut. Partisipan P2 yang mencatatkan skor terendah (70,0) juga tercatat mengalami dua kesalahan navigasi selama sesi pengujian, sementara partisipan dengan skor tertinggi (P3 dan P5) tidak mengalami kesalahan navigasi sama sekali. Pola ini mengindikasikan adanya keterkaitan antara frekuensi kesalahan interaksi dengan persepsi keterpakaian sistem, yang akan dibahas lebih lanjut pada subbagian 3.4.2.



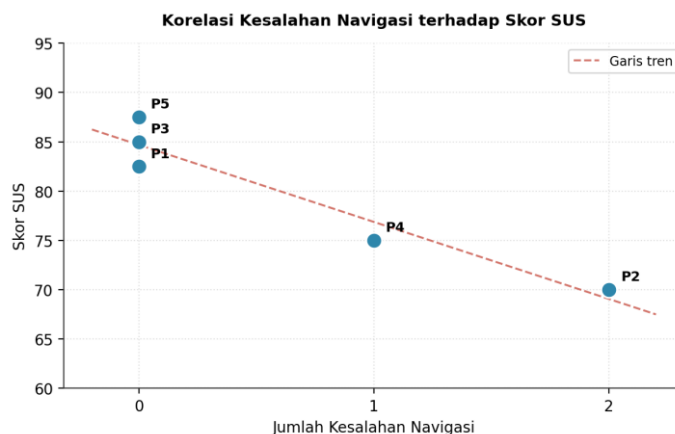
Gambar 5. Distribusi Skor System Usability Scale (SUS) per Pengguna

Pencapaian skor SUS rata-rata 78,5 menjawab tujuan penelitian secara empiris karena seluruh pengguna mampu menyelesaikan tugas utama tanpa bantuan dan dalam waktu kurang dari satu menit sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4, menunjukkan tingkat *learnability* yang memadai untuk pengguna baru. Penerapan *workflow* bertahap (F2) terbukti efektif karena sistem secara otomatis membentuk tiga sesi per lokasi dan memvisualisasikan status penyelesaian setiap sesi melalui indikator warna yang konsisten, sehingga mengurangi potensi terlewatnya tahapan dokumentasi yang merupakan masalah utama pada proses manual sebagaimana diidentifikasi pada bagian Pendahuluan. Dengan demikian, hasil penelitian ini secara konsisten mendukung hipotesis awal bahwa integrasi antara desain antarmuka berbasis kebutuhan pengguna dan struktur alur kerja bertahap dapat meningkatkan baik aspek objektif (waktu penyelesaian, jumlah kesalahan) maupun aspek subjektif (persepsi keterpakaian) dari sistem monitoring frekuensi radio.

3.4.2 Perbandingan dengan Konsep Ilmiah

Hasil penelitian ini sejalan dengan prinsip-prinsip utama dalam User-Centered Design (UCD) sebagaimana didefinisikan pada ISO 9241-210, khususnya pada aspek kesesuaian antarmuka dengan konteks penggunaan dan kebutuhan pengguna. Konsistensi penggunaan skema warna untuk representasi status (hijau = selesai, kuning = menunggu, abu-abu = belum dimulai) terbukti sesuai dengan prinsip *recognition over recall* dalam heuristik Nielsen, di mana pengguna dapat mengidentifikasi informasi tanpa harus mengingatnya secara eksplisit. Temuan bahwa seluruh pengguna mampu mengidentifikasi status sesi dalam waktu kurang dari tiga detik tanpa instruksi khusus mengonfirmasi efektivitas prinsip Gestalt mengenai penggunaan atribut pra-attentive (warna) untuk penyampaian informasi cepat pada antarmuka visual [17].

Untuk menguji lebih lanjut hubungan antara kualitas interaksi dan persepsi pengguna, dilakukan analisis korelasi sederhana antara jumlah kesalahan navigasi dengan skor SUS yang diperoleh masing-masing partisipan. Gambar 6 menyajikan visualisasi hubungan tersebut beserta garis tren linear yang menggambarkan pola hubungan kedua variabel.



Gambar 6. Korelasi Kesalahan Navigasi terhadap Skor SUS

Berdasarkan Gambar 6, tampak kecenderungan hubungan negatif antara jumlah kesalahan navigasi dengan skor SUS, semakin banyak kesalahan yang dialami pengguna, semakin rendah skor keterpakaian yang diberikan. Partisipan yang tidak mengalami kesalahan navigasi sama sekali (P1, P3, P5) secara konsisten memberikan skor SUS di atas 82, sementara partisipan P2 yang mengalami dua kesalahan mencatatkan skor terendah (70,0). Pola ini konsisten dengan prinsip *error prevention* pada sepuluh heuristik *usability* Nielsen, yang menyatakan bahwa desain yang mencegah kesalahan pengguna secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan persepsi keterpakaian sistem. Kesalahan navigasi yang terkonsentrasi pada kedekatan tombol dengan fungsi berbeda turut menunjukkan relevansi prinsip *visual proximity* dalam desain Gestalt, yakni bahwa elemen yang berdekatan secara spasial cenderung diasosiasikan memiliki fungsi yang serupa oleh pengguna, sehingga peningkatan jarak visual atau penambahan pembeda warna pada tombol dengan fungsi kritikal (seperti hapus data) perlu menjadi perhatian pada iterasi perancangan selanjutnya. Temuan ini juga mendukung konsep *learnability* dan *efficiency* dalam model *usability* Shackel yang menyatakan sistem yang baik harus dapat digunakan efisien sejak interaksi pertama, sebagaimana terbukti dari waktu penyelesaian tugas rata-rata 42 detik dan 38 detik tanpa pelatihan sebelumnya.

3.4.3 Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Untuk memberikan konteks yang lebih jelas mengenai posisi kontribusi penelitian ini terhadap kajian-kajian terdahulu, Tabel 3 merangkum perbandingan antara penelitian ini dengan empat penelitian relevan yang telah diuraikan pada bagian Pendahuluan, ditinjau dari cakupan aspek yang dibahas.

Tabel 3. Perbandingan Cakupan Penelitian dengan Kajian Terdahulu

Penelitian	Fokus Utama	Evaluasi <i>Usability</i>	Alur Kerja Bertahap	Arsitektur Edge-Cloud
Calvo-Palomino et al. [18]	Akuisisi data spektrum crowdsourcing	Tidak dibahas	Tidak dibahas	Sebagian
Runfeng et al [1]	Arsitektur IoT <i>real-time</i>	Tidak dibahas	Tidak dibahas	Dibahas
Gorden & Oluwaseun [10]	Dashboard monitoring <i>web</i>	Tidak dibahas	Tidak dibahas	Tidak dibahas
Sigh [19]	Efisiensi Edge-Cloud IoT	Tidak dibahas	Tidak dibahas	Dibahas
Penelitian ini	Dashboard monitoring frekuensi radio	Dibahas (SUS)	Dibahas	Dibahas

Sebagaimana dirangkum pada Tabel 3, penelitian ini melengkapi kesenjangan yang teridentifikasi pada kajian terdahulu dengan mengintegrasikan tiga aspek sekaligus, evaluasi *usability*, alur kerja bertahap, dan arsitektur Edge-Cloud, dalam satu sistem monitoring frekuensi radio yang utuh. Penelitian Calvo-Palomino et al. [18] pada platform Electrosense+ berfokus pada skalabilitas akuisisi data spektrum radio secara crowdsourcing namun tidak mengevaluasi aspek keterpakaian antarmuka. Penelitian ini melengkapi gap tersebut dengan menunjukkan bahwa evaluasi *usability* menggunakan SUS merupakan metode yang efektif untuk mengukur penerimaan pengguna terhadap sistem monitoring frekuensi radio. Skor SUS sebesar 78,5 yang diperoleh lebih tinggi dari ambang batas minimal 68 yang ditetapkan sebagai standar sistem yang dapat diterima dan setara dengan rata-rata skor SUS pada aplikasi *web* sebesar 68–78 menurut Sauro dan Lewis.

Sejalan dengan temuan Assad yang menunjukkan bahwa penyajian informasi melalui antarmuka dashboard meningkatkan penerimaan pengguna terhadap sistem pemantauan teknis, penelitian ini mengonfirmasi bahwa struktur navigasi tetap dan alur kerja bertahap merupakan faktor yang secara empiris berkontribusi terhadap peningkatan *usability*, dengan bukti tambahan berupa korelasi kesalahan navigasi terhadap skor SUS sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Selain itu, pendekatan *offline-first* dengan sinkronisasi asinkron yang diterapkan dalam penelitian ini memberikan solusi berbeda dari pendekatan *cloud-first* pada penelitian Runfeng et al [1], karena lebih sesuai untuk kondisi survei lapangan dengan konektivitas internet yang tidak stabil [20]. Perbedaan pendekatan arsitektur ini menunjukkan bahwa pemilihan strategi

sinkronisasi data perlu disesuaikan dengan konteks operasional sistem, bukan mengikuti satu pola arsitektur tunggal yang bersifat generik.

3.4.4 Kontribusi terhadap Pengembangan Ilmu Pengetahuan

Merujuk pada kerangka kontribusi penelitian rekayasa perangkat lunak yang membedakan kontribusi teoritis, metodologis, dan praktis, penelitian ini memberikan tiga kontribusi utama bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang *Human-Computer Interaction* dan sistem monitoring berbasis IoT. Pertama, penelitian ini menghasilkan model referensi dashboard monitoring frekuensi radio yang mengintegrasikan desain antarmuka berbasis UCD, alur kerja bertahap, dan sinkronisasi cloud pada arsitektur Edge-Cloud, yang dapat dijadikan acuan bagi penelitian selanjutnya dalam pengembangan sistem monitoring lapangan sejenis, baik pada domain spektrum radio maupun domain pemantauan lapangan lainnya seperti kualitas udara atau kondisi infrastruktur.

Kedua, penelitian ini mendemonstrasikan penerapan mekanisme *offline-first* berbasis SQLite dengan sinkronisasi asinkron ke Supabase PostgreSQL sebagai solusi yang layak dan efektif untuk sistem yang beroperasi di area dengan konektivitas terbatas, melengkapi literatur yang selama ini lebih banyak berfokus pada solusi berbasis *cloud-first*. Bukti kuantitatif berupa keberhasilan seluruh partisipan menyelesaikan tugas tanpa mengalami kegagalan sinkronisasi selama pengujian memperkuat argumen bahwa arsitektur ini dapat diandalkan pada skenario penggunaan nyata. Ketiga, penelitian ini memberikan bukti empiris kuantitatif, melalui kombinasi skor SUS, waktu penyelesaian tugas, dan analisis korelasi kesalahan navigasi, bahwa sistem monitoring frekuensi radio berbasis hardware murah (RTL-SDR dan Raspberry Pi) dapat dilengkapi antarmuka yang terpakai dengan skor SUS dalam kategori Good, sehingga memberikan alternatif solusi berbiaya rendah yang dapat diimplementasikan pada lembaga pendidikan, penelitian, maupun regulator frekuensi.

Untuk merangkum ketiga kontribusi tersebut secara ringkas beserta bukti pendukung yang telah diuraikan, Tabel 4 menyajikan ikhtisar kontribusi penelitian ini.

Tabel 4. Ringkasan Tiga Kontribusi Penelitian dan Bukti Pendukung

Kontribusi	Deskripsi Singkat	Bukti Pendukung dalam Penelitian
Model referensi dashboard	Integrasi UCD, <i>workflow</i> bertahap, dan arsitektur Edge-Cloud dalam satu sistem	Struktur 7 halaman (Gambar 1) & arsitektur 3 lapisan (Gambar 2)
Validasi arsitektur <i>offline-first</i>	Sinkronisasi asinkron SQLite-Supabase sebagai solusi konektivitas terbatas	Nol kegagalan sinkronisasi selama pengujian (Subbab 2.6)
Bukti empiris hardware terjangkau	Sistem berbasis RTL-SDR & Raspberry Pi dapat mencapai <i>usability</i> kategori Good	Skor SUS 78,5 (Gambar 5), kategori Good menurut Molina-Tenorio [21]

3.4.5 Keterbatasan dan Peluang Penelitian Lanjutan

Sebagaimana disarankan oleh Nielsen, pengujian *usability* dengan lima partisipan umumnya cukup untuk mengidentifikasi sekitar 85% permasalahan *usability* utama pada suatu antarmuka. Meskipun demikian, jumlah partisipan yang terbatas pada penelitian ini membatasi generalisasi statistik terhadap populasi pengguna yang lebih luas dan beragam.

Selain keterbatasan jumlah partisipan, pengujian pada penelitian ini masih dilakukan dalam kondisi simulasi dengan konektivitas jaringan yang relatif stabil, sehingga belum merepresentasikan sepenuhnya tantangan kondisi lapangan nyata. Faktor-faktor seperti konektivitas internet yang berfluktuasi, ukuran layar perangkat yang bervariasi (smartphone, tablet, laptop), serta tekanan waktu pengukuran berpotensi memengaruhi pengalaman pengguna secara berbeda. Dari aspek teknis, sistem juga belum memiliki mekanisme *conflict resolution* untuk skenario multi-operator yang mengedit data secara bersamaan dalam kondisi offline, yang perlu menjadi prioritas pengembangan berikutnya.

Terkait aspek skalabilitas sistem, penelitian ini juga membuka peluang pengembangan pada domain pemantauan spektrum yang lebih luas. Mekanisme REST API yang diterapkan memungkinkan integrasi dengan berbagai platform SDR lain selain RTL-SDR, sehingga dashboard yang dirancang berpotensi menjadi antarmuka universal untuk berbagai jenis perangkat penerima sinyal radio. Penambahan fitur analisis sinyal berbasis *machine learning*

secara langsung di dalam dashboard, misalnya klasifikasi sinyal otomatis menggunakan model CNN yang terintegrasi dengan backend Flask, dapat meningkatkan nilai tambah sistem secara signifikan tanpa memerlukan perangkat keras tambahan yang mahal.

Ke depan, penelitian lanjutan direkomendasikan untuk mengembangkan fitur kolaborasi multi-pengguna dengan manajemen hak akses berbasis peran, notifikasi *real-time* menggunakan *WebSocket*, serta integrasi otomatis dengan *pipeline* analisis *machine learning* untuk klasifikasi sinyal frekuensi radio. Pengujian pada kondisi lapangan sesungguhnya dengan jumlah partisipan yang lebih besar dan beragam latar belakang teknis juga perlu dilakukan untuk memvalidasi generalisasi temuan penelitian ini. Dalam konteks implementasi di institusi pendidikan atau lembaga regulator frekuensi, kemudahan penggunaan yang telah divalidasi melalui evaluasi SUS pada penelitian ini menjadi dasar yang kuat untuk adopsi dan pengembangan lebih lanjut oleh pengguna dengan berbagai latar belakang teknis.

Sebagai rangkuman, Tabel 5 menyajikan matriks keterbatasan penelitian ini beserta dampaknya terhadap validitas hasil dan rekomendasi tindak lanjut yang relevan untuk setiap keterbatasan.

Tabel 5. Matriks Keterbatasan Penelitian dan Rekomendasi Lanjutan

Keterbatasan	Dampak terhadap Hasil	Rekomendasi Penelitian Lanjutan
Jumlah partisipan terbatas (n=5)	Generalisasi statistik terbatas pada populasi lebih luas	Pengujian dengan partisipan lebih besar & beragam latar belakang
Kondisi jaringan simulasi (stabil)	Belum merepresentasikan fluktuasi konektivitas lapangan nyata	Pengujian pada kondisi survei lapangan aktual
Belum ada <i>conflict resolution</i>	Risiko konflik data pada skenario multi-operator offline	Mekanisme <i>versioning & conflict resolution</i> pada sinkronisasi
Belum ada kolaborasi multi-pengguna	Koordinasi tim survei masih manual di luar sistem	Manajemen hak akses berbasis peran & notifikasi <i>WebSocket real-time</i>

3.4.6 Implikasi Praktis dan Rekomendasi Implementasi

Selain kontribusi teoritis yang telah diuraikan pada subbagian 3.4.4, hasil penelitian ini juga memberikan implikasi praktis yang dapat langsung diadopsi oleh pengembang sistem monitoring serupa. Pertama, temuan bahwa kesalahan navigasi berkorelasi negatif dengan skor SUS (Gambar 6) memberikan justifikasi kuantitatif bahwa investasi pada detail interaksi kecil, seperti jarak antar tombol, kontras warna, dan penempatan elemen kritis, memiliki dampak yang terukur terhadap penerimaan pengguna secara keseluruhan, bukan sekadar aspek estetika semata. Rekomendasi praktis yang dapat ditarik adalah pengembang sistem sejenis perlu mengalokasikan waktu pengujian *usability* formatif pada tahap awal pengembangan, bukan hanya pada tahap akhir sebagai validasi, agar kesalahan interaksi dapat diperbaiki sebelum sistem digunakan secara luas di lapangan.

Kedua, konsistensi antara waktu penyelesaian tugas yang singkat (Gambar 4) dengan skor SUS yang tinggi (Gambar 5) menunjukkan bahwa desain *workflow* bertahap dapat direplikasi pada domain survei lapangan lain yang memiliki karakteristik serupa, yaitu proses multi-tahap dengan kebutuhan dokumentasi terstruktur, seperti survei geospasial, inspeksi infrastruktur, atau pemantauan lingkungan. Prinsip inti yang dapat digeneralisasi adalah pembagian proses kompleks menjadi unit-unit kerja diskret dengan status yang dapat dipantau secara visual, bukan hanya spesifik pada konteks monitoring frekuensi radio. Ketiga, keberhasilan arsitektur *offline-first* dalam menjaga kelangsungan operasi sistem tanpa kegagalan sinkronisasi selama pengujian memberikan preseden praktis yang sejalan dengan kerangka gating kualitas data pada *pipeline* berbasis cloud [22], sekaligus menjadi acuan bagi pengembang sistem IoT lapangan lain untuk mempertimbangkan pola arsitektur serupa ketika target implementasi berada pada area dengan konektivitas internet yang tidak dapat diandalkan sepenuhnya, sebuah kondisi yang umum dijumpai pada kegiatan survei di lapangan terbuka maupun daerah terpencil.

Sebagai penutup subbagian implikasi praktis, Tabel 6 merangkum keterkaitan antara temuan kuantitatif penelitian dengan rekomendasi praktis yang dapat langsung diadopsi oleh pengembang sistem monitoring serupa.

Tabel 6. Matriks Temuan Penelitian dan Rekomendasi Praktis Implementasi

Temuan Penelitian	Rekomendasi Praktis bagi Pengembang Sistem Serupa
Korelasi negatif error navigasi vs skor SUS (Gambar 6)	Alokasikan waktu pengujian <i>usability</i> formatif sejak tahap awal, bukan hanya validasi akhir
Waktu tugas singkat + SUS tinggi berjalan beriringan (Gambar 4 & 5)	Terapkan prinsip <i>workflow</i> bertahap pada domain survei lapangan lain (geospasial, inspeksi infrastruktur)
Nol kegagalan sinkronisasi <i>offline-first</i> selama pengujian	Pertimbangkan arsitektur serupa untuk sistem IoT pada area konektivitas tidak stabil

3.5 Implikasi terhadap Arsitektur dan Keberlanjutan Sistem

Selain implikasi pada aspek antarmuka, hasil evaluasi juga memberikan gambaran mengenai kesesuaian arsitektur backend yang mendasari dashboard. Waktu penyelesaian tugas yang relatif singkat dan minimnya kesalahan navigasi mengindikasikan bahwa penyimpanan data secara lokal melalui SQLite mampu memberikan respons antarmuka yang cepat tanpa hambatan yang disebabkan oleh proses sinkronisasi ke basis data cloud, karena proses tersebut berjalan secara asinkron pada *background thread* yang terpisah dari alur permintaan pengguna. Dengan demikian, pendekatan *offline-first* yang diterapkan pada arsitektur sistem turut berkontribusi terhadap pengalaman pengguna yang stabil, khususnya pada kondisi survei lapangan dengan konektivitas jaringan yang tidak selalu tersedia.

Meskipun demikian, pengujian pada penelitian ini masih dilakukan dalam kondisi simulasi dengan konektivitas jaringan yang relatif stabil. Kondisi lapangan yang sesungguhnya berpotensi menghadirkan tantangan tambahan, seperti kemungkinan konflik data pada saat sinkronisasi ulang setelah perangkat kembali terhubung ke jaringan pasca periode offline yang panjang. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu mengevaluasi bagaimana antarmuka menyampaikan status sinkronisasi kepada pengguna serta bagaimana mekanisme penanganan konflik data dirancang agar tidak mengurangi kepercayaan pengguna terhadap keakuratan data yang ditampilkan pada dashboard.

4. Simpulan

Penelitian ini bertujuan merancang dan mengevaluasi dashboard web dengan antarmuka dan alur kerja bertahap untuk manajemen data survei frekuensi radio multi-lokasi berbasis arsitektur *Edge-Cloud*. Hasil perancangan dan pengujian menunjukkan bahwa tujuan tersebut tercapai melalui tiga temuan yang saling memperkuat. Pertama, struktur antarmuka tujuh halaman berbasis prinsip *User-Centered Design* dengan alur kerja bertahap terbukti membantu pengguna menyelesaikan tugas utama dengan cepat tanpa pelatihan sebelumnya. Kedua, evaluasi SUS terhadap lima partisipan menghasilkan skor rata-rata dalam kategori *Good*, dengan korelasi negatif antara kesalahan navigasi dan skor SUS yang mengonfirmasi pentingnya konsistensi indikator visual dan penempatan elemen antarmuka. Ketiga, arsitektur *offline-first* berbasis SQLite dengan sinkronisasi ke Supabase terbukti menjaga kelangsungan operasi sistem tanpa kegagalan sinkronisasi, memvalidasi kesesuaiannya untuk konteks survei lapangan dengan konektivitas tidak stabil.

Secara teoretis, penelitian ini memperkaya kajian integrasi UCD, *workflow* bertahap, dan arsitektur *Edge-Cloud* dalam satu sistem monitoring yang utuh, kombinasi yang belum banyak dibahas komprehensif pada penelitian terdahulu. Secara praktis, penelitian ini membuktikan bahwa sistem berbasis hardware terjangkau (RTL-SDR dan Raspberry Pi) dapat dilengkapi antarmuka dengan keterpakaian baik tanpa investasi mahal, sehingga berpotensi diadopsi oleh institusi pendidikan, laboratorium penelitian, maupun lembaga regulator frekuensi dengan sumber daya terbatas.

Keterbatasan penelitian ini terletak pada jumlah partisipan dan kondisi pengujian yang masih simulatif dengan konektivitas relatif stabil, sehingga generalisasi terhadap kondisi lapangan nyata perlu divalidasi lebih lanjut. Penelitian lanjutan disarankan mencakup pengujian pada kondisi lapangan aktual dengan partisipan lebih besar dan beragam, serta pengembangan fitur kolaborasi multi-pengguna, mekanisme conflict resolution untuk sinkronisasi *offline*, notifikasi real-time berbasis *WebSocket*, dan integrasi pipeline machine learning untuk klasifikasi sinyal. Dengan pengembangan tersebut, dashboard ini berpotensi berkembang menjadi platform

monitoring frekuensi radio yang lebih komprehensif dan mendukung koordinasi tim survei secara lebih efektif.

Daftar Referensi

- [1] R. Tian, Z. Wang, and P. Zhao, "Smart carbon nanomaterial-based electrochemical sensor network with *edge computing* for *real-time* water quality monitoring ☆," *Microchem. J.*, vol. 221, no. October 2025, p. 116795, 2026, doi: 10.1016/j.microc.2025.116795.
- [2] T. A. Bablu and M. T. Rashid, "Edge Computing and Its Impact on *Real-time* Data Processing for IoT-Driven Applications," *Journal of Advanced Computing Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 26–43, Jan. 2025, doi: 10.69987/JACS.2025.50103.
- [3] F. Sabur and M. Nur, "Feasibility Test of Raspberry Pi Based Spectrum Analyzer and Transfer Level Register-Software Defined Radio as Learning Media for Frequency Measurement," *AL-ISHLAH: Jurnal Pendidikan*, vol. 14, no. 2, pp. 2087–2098, 2022, doi: 10.35445/alishlah.v14i2.1459.
- [4] R. C. Neupane, "A General Architecture for a *Real-time* Monitoring System Based on the Internet of Things," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Internet of Things and Machine learning*, pp. 1–6, 2020, doi: 10.1145/3386164.3387295.
- [5] G. A. Mutiara, Periyadi, and M. R. Alfarisi, "Design and Implementation of a REST API-Based Client-Server Architecture for Multi-Sensor IoT Monitoring," *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, vol. 12, no. 124, pp. 426–449, 2025, doi: 10.19101/IJATEE.2024.111101934.
- [6] E. Mabotha, N. E. Mabunda, A. Ali, and B. Khan, "Exploring Dynamic RESTful API Implementation in IoT Environments Using Docker," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, pp. 1–22, 2025, Art. no. 34267, doi: 10.1038/s41598-025-16460-0.
- [7] A. Čop, B. Bertalančič, and C. Fortuna, "Journal of Network and Computer Applications An overview and solution for democratizing AI *workflows* at the network edge," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 239, no. March, p. 104180, 2025, doi: 10.1016/j.jnca.2025.104180.
- [8] R. H. Assaad, M. Mohammadi, and O. Poudel, "Sensors and Actuators: A . Physical Developing an intelligent IoT-enabled wearable multimodal biosensing device and cloud-based digital dashboard for *real-time* and comprehensive health , physiological , emotional , and cognitive monitoring using multi-sensor fusion technologies," *Sensors Actuators A. Phys.*, vol. 381, no. August 2024, p. 116074, 2025, doi: 10.1016/j.sna.2024.116074.
- [9] A. Montagni, S. Bregaglio, and S. Bajocco, "Ecological Informatics An open-source cloud-based procedure for MODIS remote sensing products: The *nasaweb* service python package," *Ecol. Inform.*, vol. 79, no. July 2023, p. 102433, 2024, doi: 10.1016/j.ecoinf.2023.102433.
- [10] D. Gorden and J. M. Oluwaseun, "A Web-Based *Real-time* Pandemic Monitoring System," *Journal of Multidisciplinary Research and Development*, vol. 2, no. 2, pp. 1–17, 2025, doi: 10.61440/JMDR.2025.v2.10.
- [11] J. Panayides, J. du Toit, N. Neyt, D. Riley, and J. Panayides, "Use of open-source software platform to develop dashboards for control and automation of flow chemistry equipment," *Digital Discovery*, vol. 1, no. 5, pp. 596–604, 2022, doi: 10.1039/D2DD00036A.
- [12] R. Bacci and C. Scali, "A Cloud-Based Monitoring System for Performance Assessment of Industrial Plants," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 59, no. 6, pp. 2341–2352, 2020, doi: 10.1021/acs.iecr.9b06638.
- [13] S. Ellison, H. Kishan, S. Vappangi, S. Dayal, and N. Kumar, "Review article A comprehensive review on applications of Raspberry Pi," *Comput. Sci. Rev.*, vol. 52, no. November 2023, p. 100636, 2024, doi: 10.1016/j.cosrev.2024.100636.
- [14] T. Adiono *et al.*, "Design and implementation of a *real-time* SDR-FPGA-based versatile radio frequency OFDM system ☆," *Integration*, vol. 105, no. October 2024, p. 102486, 2025, doi: 10.1016/j.vlsi.2025.102486.
- [15] M. Wahlgård, P. Krajník, and J. Stahre, "ScienceDirect A Scalable *Edge computing* Solution for *Real-time* Process Monitoring and Optimization in Industrial IoT," *Procedia CIRP*, vol. 134, pp. 903–908, 2025, doi: 10.1016/j.procir.2025.02.219.
- [16] C. D. Vo, T. Nguyen, and D. A. Dang, "A low-cost IoT architecture with RF communication and data analytics for *real-time* productivity monitoring in garment manufacturing," *ISCIENCE*, vol. 29, no. 1, p. 114536, 2026, doi: 10.1016/j.isci.2025.114536.

- [17] S. Ahmadou, Y. El, H. Oufettoul, and I. Ait, "Scalable *edge computing* architecture for multi-site photovoltaic systems monitoring : A modular microservice-based approach," *Unconv. Resour.*, vol. 12, no. August 2025, p. 100355, 2026, doi: 10.1016/j.unres.2026.100355.
- [18] R. Calvo-palomino *et al.*, "Electrosense + : Crowdsourcing radio spectrum decoding using IoT receivers," *Comput. Networks*, vol. 174, no. April, p. 107231, 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107231.
- [19] R. Singh and T. Kiss, "Edge-Cloud Synergy: Unleashing the Potential of Parallel Processing for Big Data Analytics," in *2022 IEEE 13th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, IEEE, 2022, doi: 10.1109/IEMCON56893.2022.9946590.
- [20] S. Cui, "Advanced Engineering Informatics Edge-to-cloud computing and intelligence for IoT-based Structural Health Monitoring : A comprehensive review," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 71, no. PB, p. 104300, 2026, doi: 10.1016/j.aei.2025.104300.
- [21] Y. Molina-Tenorio, A. Prieto-Guerrero, and R. Aguilar-Gonzalez, "Real-time Implementation of Multiband Spectrum Sensing Using SDR Technology," *Sensors*, vol. 21, no. 10, p. 3506, 2021, doi: 10.3390/s21103506.
- [22] N. Mangala, "Real-time Data Quality Monitoring and Gating Frameworks in Cloud-Based Data Pipelines," *International Journal of Research and Applied Innovations*, vol. 5, no. 6, pp. 8197–8219, 2022, doi: 10.15662/IJRAI.2022.0506029.