



PENGEMBANGAN ARSITEKTUR SISTEM *E-LEARNING* “ZonaCerdas” BERBASIS WEB MELALUI IMPLEMENTASI MODEL INKREMENTAL DAN INTEGRASI MULTIMEDIA UNTUK OPTIMALISASI EKOSISTEM PENDIDIKAN DIGITAL

Keefa Noah Lasut ¹, Nabil Hamba Illahi ², Beverly Daniel Velix Rauan ³,
Sherwin Reinaldo U Aldo Sompie ⁴, Wahyuni Fithratul Zalmi ⁵,
Brave Angkasa Sugiarso ⁶, Ade Yusupa ⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi
Kota Manado, Indonesia

E-mail: keefalasut026@student.unsrat.ac.id^{1*}

nabilillahi026@student.unsrat.ac.id^{2*}

beverlyrauan026@student.unsrat.ac.id^{3*}

aldo@unsrat.ac.id^{4*}

wahyuni.fithratul.zalmi@unsrat.ac.id^{5*}

brave@unsrat.ac.id^{6*}

ade@unsrat.ac.id^{7*}

ABSTRACT

This study aims to design and implement “ZonaCerdas,” a web-based e-learning platform developed in response to the need for digital transformation in education and to support the Merdeka Curriculum. Utilizing the Incremental Model methodology, the system was constructed gradually through three main phases: user authentication management, multimedia content integration, and interactive evaluation module development. The system architecture applies a content offloading strategy by separating application logic (PHP/MySQL) from video content storage integrated via the Google Drive API to enhance storage efficiency and server performance. Functional testing results using the Black Box Testing method indicate that all features operate with 100% validity. Furthermore, the implementation of stateless quizzes successfully provided real-time evaluation feedback. This study concludes that the hybrid architecture approach and incremental development are effective in producing a scalable and responsive educational system in resource-constrained environments.

Keywords: *E-Learning, Incremental Model, PHP MySQL, Content Offloading, Digital Education.*

Article History

Received: November 2025

Reviewed: November 2025

Published: November 2025

Plagiarism Checker No
235

Prefix DOI :

[10.8734/Kohesi.v1i2.365](https://doi.org/10.8734/Kohesi.v1i2.365)

Copyright : Author

Publish by : Kohesi



This work is licensed
under a [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)
[Attribution-NonCommercial](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)
[4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)
[License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

**ABSTRAK**

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan "ZonaCerdas", sebuah platform *e-learning* berbasis web yang dikembangkan sebagai respons terhadap kebutuhan transformasi digital dalam pendidikan dan dukungan terhadap Kurikulum Merdeka. Menggunakan metodologi *Incremental Model*, sistem dibangun secara bertahap melalui tiga fase utama: manajemen otentikasi pengguna, integrasi konten multimedia, dan pengembangan modul evaluasi interaktif. Arsitektur sistem menerapkan strategi *content offloading* dengan memisahkan logika aplikasi (PHP/MySQL) dari penyimpanan konten video yang diintegrasikan melalui Google Drive API, guna meningkatkan efisiensi penyimpanan dan kinerja peladen. Hasil pengujian fungsional menggunakan metode *Black Box Testing* menunjukkan bahwa seluruh fitur beroperasi dengan tingkat validitas 100%. Selain itu, implementasi kuis *stateless* berhasil memberikan umpan balik evaluasi secara *real-time*. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pendekatan arsitektur hybrid dan pengembangan inkremental efektif dalam menghasilkan sistem pendidikan yang skalabel dan responsif pada lingkungan dengan sumber daya terbatas.

Kata Kunci: *E-Learning, Model Inkremental, PHP MySQL, Content Offloading, Pendidikan Digital.*

1. PENDAHULUAN

Transformasi digital yang masif dalam satu dekade terakhir telah memaksa pergeseran paradigma pendidikan global dari metode konvensional tatap muka menuju ekosistem *E-Learning* yang adaptif guna mendukung fleksibilitas Kurikulum Merdeka dan mengatasi disparitas aksesibilitas materi ajar (Dadang & Karep, 2025). Dalam konteks pengembangan sistem layanan institusi, aplikasi berbasis web terbukti menjadi jembatan komunikasi vital untuk menjamin kontinuitas layanan ketika interaksi fisik terkendala (Solli & Sompie, 2021). Namun, tantangan utama dalam transisi ini adalah penyediaan media yang mampu mengakomodasi gaya belajar generasi *digital natives*, mengingat metode tekstual statis seringkali gagal mempertahankan atensi siswa dibandingkan pendekatan visual yang dinamis (Yusupa *et al.*, 2025). Oleh karena itu, pengembangan platform "ZonaCerdas" difokuskan pada integrasi multimedia interaktif, yang secara empiris terbukti dapat menstimulasi motivasi belajar siswa secara signifikan pada jenjang pendidikan dasar dan menengah (Nelwan *et al.*, 2020). Strategi ini juga sejalan dengan prinsip siklus hidup pengembangan multimedia yang menekankan pentingnya tahap distribusi konten yang efisien agar materi dapat diakses tanpa hambatan teknis oleh pengguna akhir (Mangindaan *et al.*, 2018).



Dari perspektif rekayasa perangkat lunak, pembangunan infrastruktur *E-Learning* yang tangguh namun efisien biaya memerlukan arsitektur data yang terencana matang, terutama dalam pengelolaan alur informasi surat atau konten digital pada instansi dengan sumber daya terbatas (Zalmi, 2023). ZonaCerdas mengadopsi teknologi *open-source* PHP dan MySQL dengan strategi *content offloading* ke penyimpanan awan, sebuah pendekatan yang menawarkan fleksibilitas tinggi dan efisiensi operasional. Selain manajemen konten, aspek evaluasi yang objektif menjadi komponen kritis; sistem harus menerapkan metode penilaian terstruktur untuk menghindari bias dan mendukung pengambilan keputusan yang akurat terkait performa siswa, sebagaimana diterapkan dalam sistem pendukung keputusan modern (Zalmi *et al.*, 2023). Guna memitigasi risiko kegagalan pengembangan sistem yang kompleks ini, penelitian menerapkan metodologi *Incremental Model*, yang memungkinkan fitur-fitur krusial dirilis dan divalidasi secara bertahap berdasarkan umpan balik pengguna sebelum fungsionalitas penuh diimplementasikan (Rachman, *et al.*, 2020b).

2. METODE PENELITIAN

2.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan Research and Development (R&D) yang difokuskan pada rekayasa perangkat lunak untuk menghasilkan produk berupa sistem *E-Learning* berbasis web. Kerangka kerja pengembangan sistem menerapkan metodologi *Incremental Model*, sebuah pendekatan di mana sistem dibangun dan dirilis dalam serangkaian tahapan fungsional (inkremen) hingga mencapai bentuk akhir yang utuh (Rachman *et al.*, 2020). Pemilihan model inkremental didasari oleh kebutuhan untuk memitigasi risiko kegagalan pengembangan pada sistem yang kompleks dengan memecah fitur-fitur utama seperti otentikasi, manajemen konten video, dan evaluasi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil dan terkelola. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip pengembangan sistem multimedia yang menekankan pada fleksibilitas dan adaptabilitas terhadap kebutuhan pengguna selama siklus hidup pengembangan (Mangindaan *et al.*, 2018).

2.2. Tahapan Penelitian

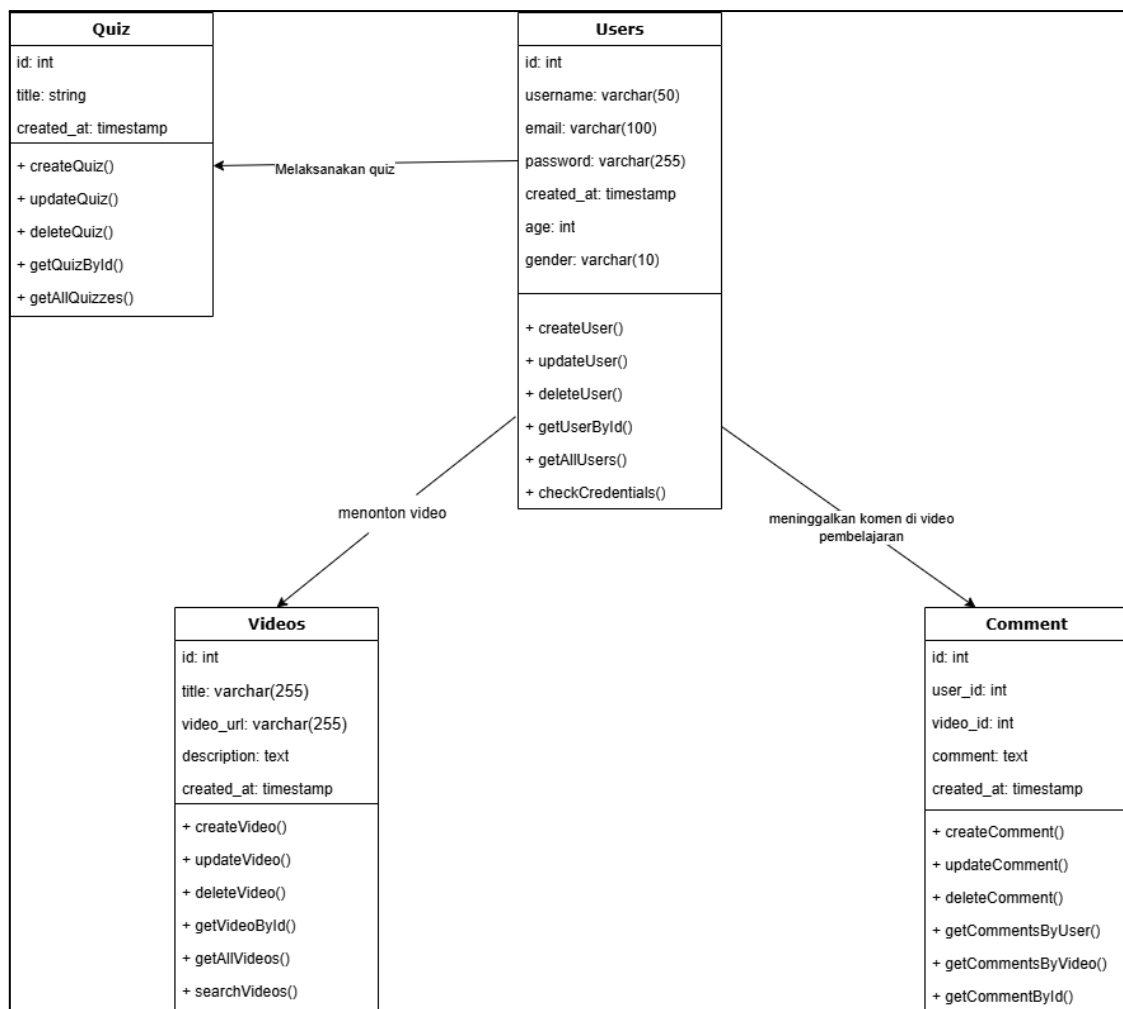
Proses penelitian dilaksanakan melalui serangkaian tahapan sistematis yang mengintegrasikan prinsip rekayasa web dan desain multimedia:

2.2.1 Analisis Kebutuhan (*Requirement Analysis*)

Tahap ini mengidentifikasi kebutuhan fungsional sistem untuk mendukung pembelajaran mandiri, seperti kebutuhan akan media visual yang interaktif untuk meningkatkan pemahaman konsep siswa (Yusupa *et al.*, 2025).

2.2.2 Perancangan Sistem (*System Design*)

Perancangan mencakup arsitektur *client-server*, skema basis data relasional untuk menjaga integritas data pengguna dan materi, serta desain antarmuka (*User Interface*) yang responsif. Desain basis data mengacu pada standar sistem informasi manajemen untuk memastikan efisiensi alur data masuk dan keluar (Zalmi, 2023). Struktur data dan relasi antar-entitas seperti Pengguna, Video, dan Kuis dirancang menggunakan pendekatan berorientasi objek sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Kelas (Class Diagram) Skema Basis Data

2.2.3 Implementasi Inkremental (Construction):

- Inkremen 1: Pembangunan fondasi keamanan sistem, meliputi modul registrasi dan login dengan enkripsi data.
- Inkremen 2: Integrasi konten multimedia menggunakan strategi *content offloading* ke penyimpanan awan untuk efisiensi *bandwidth*.
- Inkremen 3: Pengembangan logika interaktif untuk fitur kuis dan komentar.

2.2.4 Pengujian dan Evaluasi (*Testing & Evaluation*)

Melakukan verifikasi fungsionalitas pada setiap akhir inkremen sebelum integrasi penuh.

2.3. Objek dan Subjek Penelitian

Objek utama dalam penelitian ini adalah perangkat lunak "ZonaCerdas", sebuah platform *Learning Management System (LMS)* berbasis web. Subjek penelitian atau target pengguna sistem adalah siswa, guru, dan administrator yang berinteraksi dalam ekosistem pendidikan digital. Fokus pengembangan diarahkan pada penciptaan antarmuka yang ramah pengguna (*user-friendly*) guna menstimulasi minat belajar siswa, khususnya pada jenjang pendidikan yang membutuhkan visualisasi materi konkret (Nelwan *et al.*, 2020).

2.4. Instrumen dan Alat Pengembangan

Untuk mendukung pengembangan sistem yang robust dan efisien, penelitian ini memanfaatkan seperangkat instrumen perangkat keras dan lunak sebagai berikut:

2.4.1 Lingkungan Pengembangan

XAMPP sebagai paket server lokal yang menyediakan Apache Web Server dan MySQL.

2.4.2 Bahasa Pemrograman

PHP (Hypertext Preprocessor) digunakan untuk logika *backend* karena keandalannya dalam menangani permintaan server dinamis, disandingkan dengan HTML5, CSS3, dan JavaScript untuk antarmuka *frontend*.

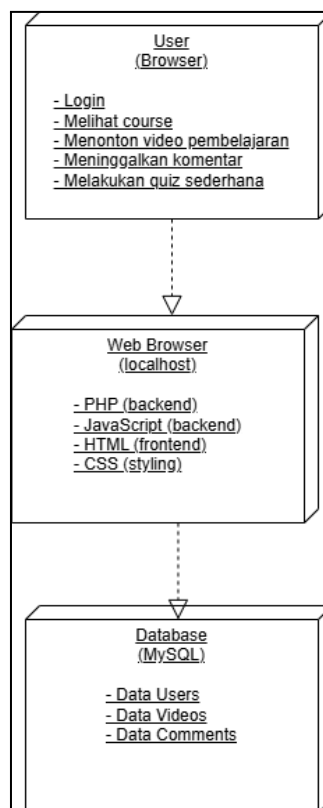
2.4.3 Manajemen Basis Data

MySQL digunakan sebagai RDBMS (Relational Database Management System). Pemilihan ini didasarkan pada kemampuan MySQL dalam menangani relasi data yang kompleks secara efisien, sebagaimana diterapkan dalam pengembangan sistem aplikasi surat dan arsip digital (Zalmi, 2023).

2.4.4 Content Delivery

Google Drive API digunakan sebagai instrumen penyimpanan eksternal untuk hosting video pembelajaran.

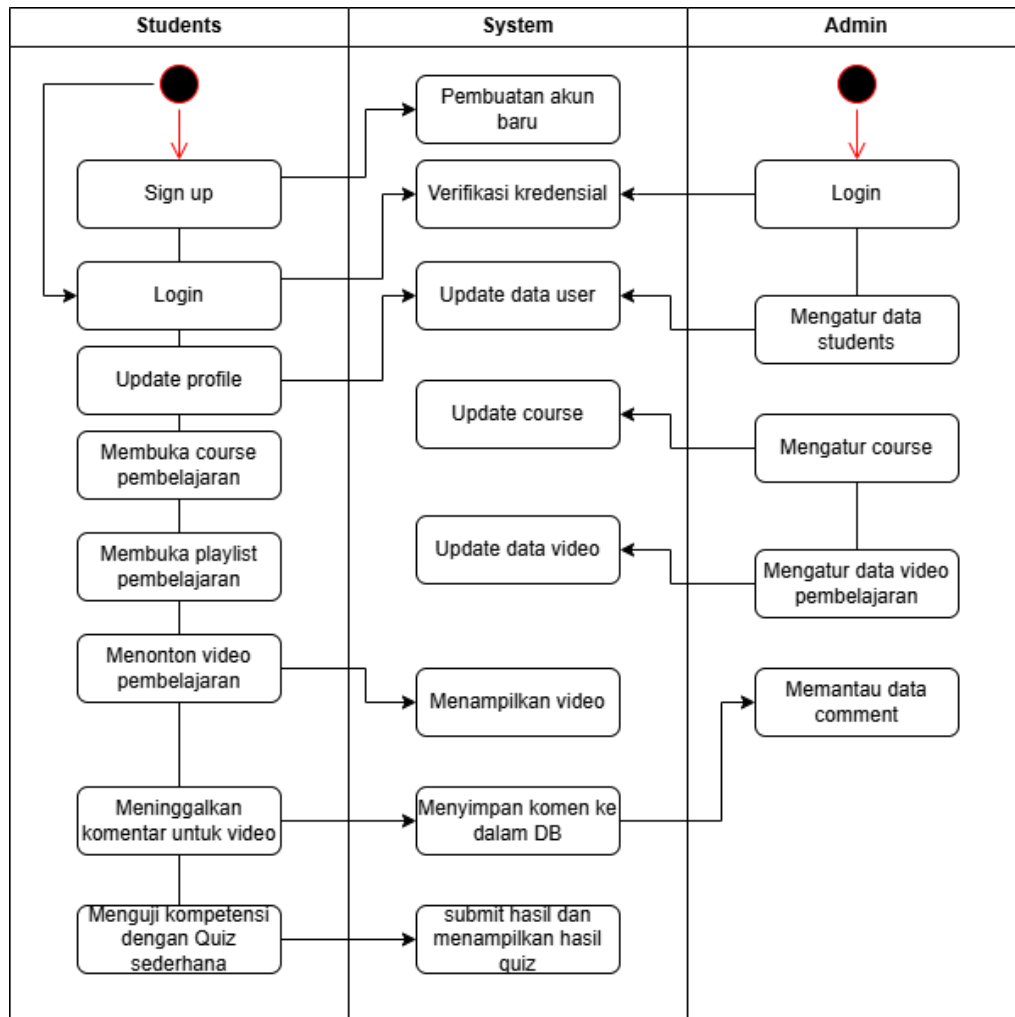
Keterkaitan antar modul perangkat lunak dalam lingkungan pengembangan digambarkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Komponen Perangkat Lunak

2.5. Metode Analisis Data dan Algoritma Sistem

Analisis data dalam sistem ini berfokus pada logika pemrosesan transaksi pembelajaran. Alur interaksi lengkap antara siswa, sistem, dan administrator, mulai dari proses registrasi hingga evaluasi, digambarkan dalam diagram aktivitas berikut:



Gambar 3. Diagram Aktivitas (Activity Diagram) Alur Pembelajaran ZonaCerdas

Algoritma sistem dirancang untuk menangani alur kerja berikut:

2.5.1 Manajemen Sesi dan Keamanan

Menggunakan algoritma hashing untuk enkripsi kata sandi dan manajemen sesi PHP untuk membatasi hak akses antara pengguna biasa dan administrator, mengadopsi standar keamanan pada aplikasi web layanan institusi (Solli & Sompie, 2021).

2.5.2 Logika Evaluasi Otomatis

Pada modul kuis, sistem menerapkan algoritma pencocokan pola sederhana (*pattern matching*) untuk membandingkan input jawaban siswa dengan kunci jawaban di sisi *client*, memberikan umpan balik skor secara *real-time*. Struktur data dirancang untuk memungkinkan pengembangan lanjut ke arah Sistem Pendukung Keputusan (SPK) di masa depan, misalnya menggunakan metode pembobotan untuk memetakan prestasi siswa (Zalmi *et al.*, 2023).

2.6. Validasi dan Evaluasi Hasil

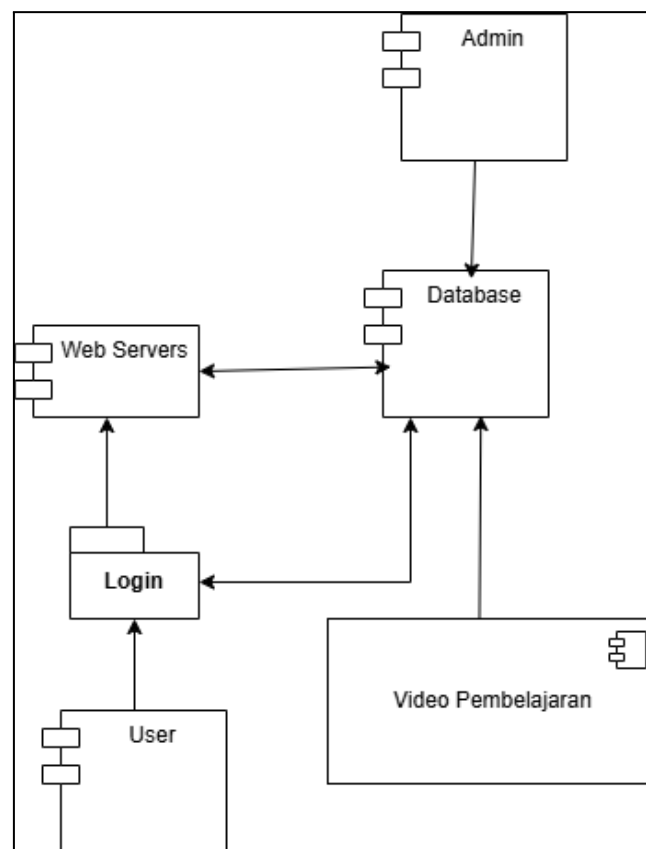
Untuk memastikan bahwa sistem yang dikembangkan valid dan bebas dari kesalahan logika, teknik evaluasi yang digunakan adalah *Black Box Testing*. Metode ini berfokus pada pengujian fungsionalitas input dan output sistem tanpa memeriksa struktur kode internalnya (Sutiah & Supriyono, 2021b). Skenario pengujian mencakup validasi proses registrasi, akurasi *streaming video* dari sumber eksternal, serta ketepatan perhitungan skor kuis. Validitas dianggap tercapai jika hasil aktual dari sistem (actual result) sesuai sepenuhnya dengan hasil yang diharapkan (expected result) pada setiap skenario uji yang dirancang.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Penelitian

3.1.1. Implementasi Arsitektur dan Antarmuka Sistem

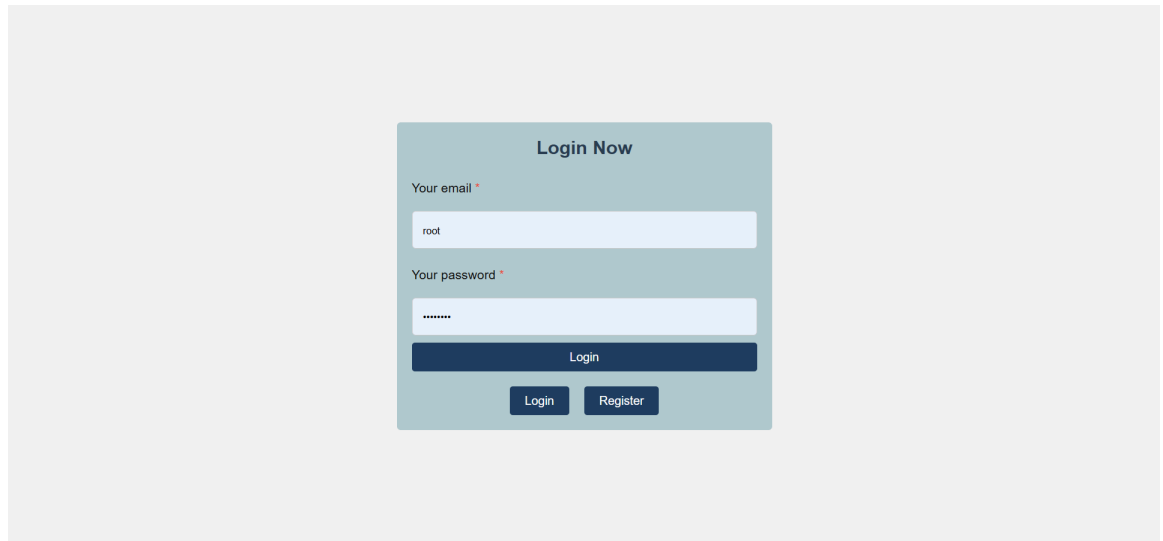
Pengembangan "ZonaCerdas" melalui pendekatan *Incremental Model* telah menghasilkan platform *Learning* berbasis web yang stabil dan responsif. Arsitektur sistem menerapkan model *Client-Server* dengan modifikasi strategis pada lapisan penyimpanan data (Data Layer). Berbeda dengan sistem konvensional yang menyimpan seluruh aset media pada peladen aplikasi, ZonaCerdas memisahkan penyimpanan konten video ke layanan *cloud storage* (Google Drive API), sementara logika aplikasi dan data tekstual dikelola oleh server Apache dan MySQL. Implementasi antarmuka (*User Interface*) dirancang dengan fokus pada *usability* dan konsistensi visual untuk meminimalkan beban kognitif pengguna saat menavigasi materi. Implementasi fisik dari arsitektur ini, yang memisahkan server aplikasi dengan server konten (Google Drive), diilustrasikan dalam diagram deployment berikut:



Gambar 4. Diagram Deployment Arsitektur Hybrid dan Content Offloading

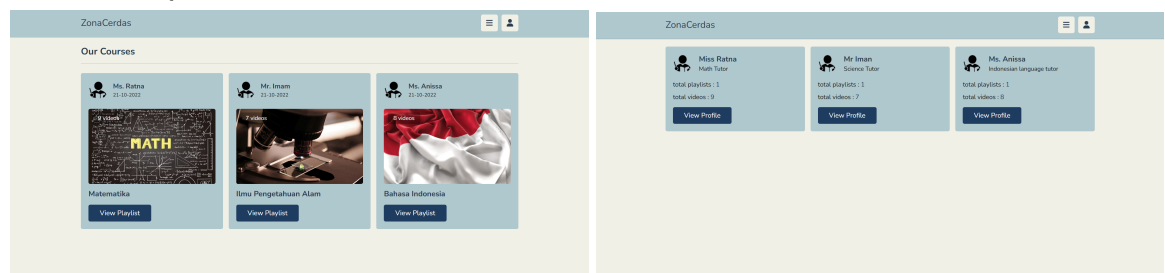
Berikut adalah penjabaran fitur utama yang berhasil diimplementasikan:

- **Modul Manajemen Akses (Authentication):** Sistem menerapkan validasi ketat pada proses registrasi dan login. Keamanan data pengguna ditingkatkan melalui enkripsi kata sandi menggunakan algoritma hashing sebelum disimpan ke dalam basis data, sejalan dengan standar keamanan pengembangan aplikasi web institusional (Solli & Sompie, 2021).



Gambar 5. Antarmuka Halaman Login dan Otentikasi

- **Pemutar Video Terintegrasi (Multimedia Delivery):** Halaman materi menyajikan daftar video yang terstruktur. Melalui integrasi iframe, video dapat diputar secara *streaming* tanpa membebani *bandwidth* peladen utama. Pendekatan ini memastikan konten visual dapat diakses dengan latensi rendah, yang krusial untuk mempertahankan atensi siswa.



Gambar 6. Tampilan Daftar Kursus dan Profil Pengajar

- **Fitur Evaluasi Mandiri (Stateless Quiz):** Sistem menyediakan kuis interaktif di akhir sesi pembelajaran. Logika pemrograman JavaScript digunakan untuk memberikan umpan balik nilai secara instan (*real-time*) kepada siswa setelah pengiriman jawaban, tanpa memerlukan reload halaman yang berlebihan.

3.1.2. Pengujian Fungsionalitas (*Black Box Testing*)

Pengujian sistem dilakukan menggunakan metode *Black Box Testing* untuk memverifikasi kesesuaian antara input, proses, dan output sistem terhadap spesifikasi kebutuhan (SRS). Pengujian ini berfokus pada validitas fungsi tanpa memeriksa struktur kode internal.

Tabel 1. Hasil Pengujian Black Box pada Fitur Utama

No	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Hasil Aktual	Status
1	Registrasi Akun	Data tersimpan di DB, enkripsi aktif, redirect ke Login	Data valid masuk tabel <code>users</code> , password terenkripsi	Valid
2	Login Valid	Masuk ke Dashboard, sesi pengguna terbentuk	Redirect ke Dashboard, menu akses terbuka	Valid
3	Login Invalid	Akses ditolak, pesan kesalahan muncul	Tetap di halaman login, notifikasi error tampil	Valid
4	Streaming Video	Video dari Google Drive berputar lancar	Video ter-load, kontrol player berfungsi	Valid
5	Interaksi Komentar	Komentar tampil dan tersimpan di DB	Komentar muncul <i>real-time</i> , data persisten	Valid
6	Logika Kuis	Skor dihitung otomatis sesuai kunci jawaban	Skor tampil akurat, umpan balik instan	Valid

Berdasarkan Tabel 1, seluruh fitur utama menunjukkan status Valid. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem bebas dari kesalahan logika (logic error) yang kritis dan siap digunakan untuk mendukung proses pembelajaran.

3.2. Pembahasan Hasil

3.2.1. Efektivitas Integrasi Multimedia dalam Pembelajaran

Temuan utama dari implementasi ZonaCerdas adalah peran vital elemen multimedia dalam ekosistem *E-Learning*. Fitur video dan kuis interaktif yang dikembangkan bukan sekadar pelengkap estetika, melainkan instrumen pedagogis yang strategis. Hal ini mendukung penelitian Yusupa, Tarigan, dan Sengkey (2025), yang membuktikan bahwa integrasi simulasi visual dan objek pembelajaran interaktif (seperti Virtual Lab) mampu meningkatkan pemahaman konseptual siswa secara signifikan dibandingkan metode tekstual statis. Dalam konteks ZonaCerdas, visualisasi materi melalui video membantu mengonkretkan konsep abstrak, sementara kuis interaktif berfungsi sebagai penguat memori (*reinforcement*) yang efektif. Lebih lanjut, Nelwan dan Yusupa (2020) menegaskan bahwa aplikasi pembelajaran yang dirancang dengan interaktivitas tinggi dapat menstimulasi motivasi intrinsik siswa, menjadikan proses belajar lebih menyenangkan dan tidak monoton.

3.2.2. Efisiensi Arsitektur Melalui *Content Offloading*

Keputusan teknis untuk memindahkan penyimpanan video ke Google Drive terbukti memberikan dampak positif terhadap kinerja sistem. Dalam pengembangan aplikasi web modern, manajemen aset multimedia sering menjadi hambatan utama performa peladen (*bottleneck*). Dengan strategi ini, ZonaCerdas berhasil mengadopsi prinsip efisiensi yang sering ditekankan dalam rekayasa perangkat lunak skala menengah. Sebagaimana dibahas dalam pengembangan aplikasi layanan web universitas, optimalisasi sumber daya server sangat penting untuk menjamin ketersediaan layanan bagi banyak pengguna secara bersamaan (Solli & Sompie, 2021). Strategi offloading ini memungkinkan ZonaCerdas beroperasi pada infrastruktur peladen dengan spesifikasi rendah namun tetap mampu menyajikan konten resolusi tinggi (*High Definition*) kepada pengguna.

3.2.3. Analisis Manajemen Data dan Potensi Pengembangan SPK

Meskipun fitur operasional berjalan dengan baik, analisis mendalam terhadap struktur data mengungkapkan sebuah peluang pengembangan yang krusial. Saat ini, fitur kuis bersifat *stateless* (nilai tidak disimpan permanen untuk analisis jangka panjang). Mengacu pada penelitian Wahyuni Fithratul Zalmi, keberadaan data historis yang lengkap adalah prasyarat mutlak untuk membangun sistem yang cerdas. Zalmi *et al.* (2023) mendemonstrasikan dalam penelitian Sistem Pendukung Keputusan (SPK) bahwa data kinerja yang terukur diperlukan untuk menerapkan metode seperti SMARTER atau MOORA guna melakukan perbandingan atau evaluasi objektif. Jika ZonaCerdas dikembangkan lebih lanjut untuk menyimpan riwayat nilai kuis siswa dalam basis data MySQL, sistem ini dapat bertransformasi dari sekadar repository konten menjadi *Intelligent Tutoring System*. Data historis tersebut dapat diolah menggunakan algoritma data mining seperti Naive Bayes atau Apriori untuk memprediksi keberhasilan siswa atau memberikan rekomendasi materi yang dipersonalisasi, sebagaimana diterapkan dalam sistem analisis data akademik lainnya (Zalmi, 2023).

3.2.4. Keamanan dan Integritas Sistem

Implementasi keamanan pada ZonaCerdas telah memenuhi standar dasar perlindungan data melalui enkripsi dan manajemen sesi. Dalam sistem informasi berbasis web, integritas data saat transit dan saat disimpan (data at rest) adalah prioritas. Hal ini sejalan dengan prinsip yang diterapkan pada sistem manajemen arsip surat digital, di mana validasi hak akses pengguna (administrator vs. user biasa) diterapkan secara ketat untuk mencegah manipulasi data (Zalmi, 2023). Kendati demikian, untuk skala implementasi yang lebih luas, penambahan lapisan keamanan seperti otentikasi dua faktor (Two-Factor Authentication) atau deteksi anomali login disarankan untuk memitigasi risiko siber yang semakin kompleks.

3.3. Sumber Data dan Analisis

Data yang disajikan dalam penelitian ini diperoleh melalui dua sumber utama. Pertama, data primer yang didapat dari hasil eksekusi pengujian perangkat lunak (software testing) secara langsung pada lingkungan *localhost*. Kedua, data sekunder berupa studi literatur dan komparasi teoritis dengan penelitian terdahulu yang relevan untuk memvalidasi keputusan desain dan arsitektur sistem. Analisis data dilakukan secara deskriptif kualitatif,



dengan membandingkan hasil keluaran sistem terhadap matriks keberhasilan yang telah ditetapkan dalam fase analisis kebutuhan (Sutiah & Supriyono, 2021).

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1. Kesimpulan

Berdasarkan seluruh tahapan perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilaksanakan, penelitian ini menyimpulkan bahwa pengembangan sistem *e-learning* "ZonaCerdas" menggunakan metodologi *Incremental Model* telah berhasil menghasilkan platform pendidikan digital yang fungsional dan adaptif. Pendekatan inkremental terbukti efektif dalam memitigasi risiko kegagalan pengembangan dengan memungkinkan perilisan fitur secara bertahap, mulai dari manajemen otentikasi hingga modul evaluasi interaktif, sehingga setiap komponen dapat divalidasi kualitasnya sebelum integrasi penuh. Secara arsitektural, penerapan strategi *content offloading* dengan mengintegrasikan penyimpanan awan Google Drive berhasil menjawab tantangan efisiensi infrastruktur. Solusi hibrida ini mampu menjaga stabilitas kinerja peladen lokal saat menyajikan konten multimedia beresolusi tinggi, sejalan dengan prinsip optimasi sumber daya pada pengembangan aplikasi web modern. Selain itu, hasil pengujian Black Box yang menunjukkan tingkat validitas 100% pada fitur utama mengonfirmasi keandalan sistem dalam mendukung proses pembelajaran. Secara pedagogis, integrasi video dan kuis interaktif memberikan kontribusi nyata dalam menciptakan lingkungan belajar yang lebih menarik dibandingkan metode konvensional, mengonfirmasi temuan bahwa visualisasi dinamis lebih efektif dalam menstimulasi pemahaman konsep siswa.

4.1. Saran

Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan agar sistem berevolusi dari sekadar repositori konten menjadi sistem cerdas berbasis data (*Intelligent Tutoring System*). Keterbatasan utama saat ini adalah sifat *stateless* pada fitur kuis, sehingga penelitian lanjutan perlu memprioritaskan pembangunan basis data nilai historis yang persisten. Data tersebut kemudian dapat diolah menggunakan metode Sistem Pendukung Keputusan (SPK) seperti SMARTER atau MOORA untuk memetakan performa siswa secara objektif dan memberikan rekomendasi materi yang dipersonalisasi. Dari sisi teknis, guna mengantisipasi lonjakan pengguna di masa depan, disarankan untuk memigrasikan arsitektur monolitik saat ini menuju arsitektur *Microservices* yang menawarkan skalabilitas lebih baik. Terakhir, ekspansi platform ke dalam bentuk aplikasi mobile (PWA) atau integrasi teknologi imersif seperti *Augmented Reality* (AR) sangat direkomendasikan untuk memperluas aksesibilitas dan memperkaya pengalaman belajar siswa di era digital.

DAFTAR PUSTAKA

Dadang, & Karep. (2025). TRANSFORMASI DIGITAL DALAM PENDIDIKAN: TANTANGAN DAN PELUANG MENUJU PEMBELAJARAN DI ERA DIGITAL. *journal.unpas.ac.id*.
<https://doi.org/10.23969/jp.v10i02.24424>



- Mangindaan, G., Tulenan, V., & Sompie, S. R. U. A. (2018). Aplikasi Simulasi Modul Pembelajaran Praktikum “Analisis Kualitatif Kuantitatif” Di Jurusan Kimia Universitas Sam Ratulangi Manado. *Jurnal Teknik Informatika*, 13(1).
- Nelwan, C. K., Mamahit, D. J., Sugiarto, B. A., & Yusupa, A. (2020). Rancang Bangun Aplikasi pembelajaran interaktif untuk anak sekolah dasar kelas 1 | *Jurnal Teknik Informatika*. ejournal.unsrat.ac.id. <https://doi.org/10.35793/jti.v15i1.29036>
- Rachman, A., Andreansyah, N., & Rahmi, N. (2020b). Implementation of incremental models on development of Web-Based loan cooperative applications. *International Journal of Education Science Technology and Engineering (IJESTE)*, 3(1), 26-34. <https://doi.org/10.36079/lamintang.ijeste-0301.105>
- Solli, N. S., & Sompie, S. R. (2021). Aplikasi Web UPT Bimbingan dan Konseling Universitas Sam Ratulangi | *Jurnal Teknik Informatika*. ejournal.unsrat.ac.id. <https://doi.org/10.35793/jti.v16i4.34145>
- Sutiah, S., & Supriyono, S. (2021b). Software testing on e-learning Madrasahs using Blackbox testing. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 1073(1), 012065. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1073/1/012065>
- Yusupa, A., Tarigan, V., & Sengkey, D. F. (2025c). Development of Virtual Lab on Collision Dynamics Learning Object with Collision Algorithm Integration. *Journal of Applied Informatics and Computing*, 9(1), 44-54. <https://doi.org/10.30871/jaic.v9i1.8765>
- Zalmi, W. F. (2023). Sistem Aplikasi Surat Masuk dan Surat Keluar Berbasis Web pada Dinas Kehutanan Provinsi Sumatera Utara. *JURNAL INFORMATIKA*, 11(1), 12-25. <https://doi.org/10.36987/informatika.v11i1.3844>
- Zalmi, W. F., Sitompul, B. J. D., Nduru, S. W., & Lumbangaol, S. K. (2023). Welder Recruitment Decision Support System using the SMARTER method. *SAGA Journal of Technology and Information System*, 1(2), 44-49. <https://doi.org/10.58905/saga.v1i2.98>