

SMARTPIXEL: MEDIA PEMBELAJARAN INTERAKTIF KONSEP CITRA

**Muhammad Naufal Musyafaa, Dean Siregar, Iwan Agi Berutu,
Khildan Rifail Azis, Hermawan Syahputra**

Ilmu Komputer, Universitas Negeri Medan

Jl. William Iskandar Ps. V, Kenangan Baru, Kec. Percut Sei Tuan,

Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara 20371, Indonesia

naufalmusyafaa@gmail.com

ABSTRAK

Pemahaman konsep dasar citra digital merupakan fondasi krusial dalam pendidikan ilmu komputer, namun sifatnya yang abstrak seringkali menjadi tantangan dalam memahami konsep citra digital. Permasalahan utama terletak pada kesulitan siswa tingkat SMP-SMA dalam memahami konsep seperti piksel, resolusi, dan transformasi geometri akibat metode pembelajaran yang cenderung teoretis dan monoton. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengembangkan SmartPixel, sebuah media pembelajaran interaktif berbasis web yang dirancang untuk membantu siswa memahami konsep-konsep tersebut melalui pendekatan yang lebih praktis dan menarik. Metode yang digunakan adalah Penelitian dan Pengembangan (R&D) yang melalui tahapan sistematis, meliputi analisis kebutuhan, perancangan, pengembangan, implementasi, dan perencanaan evaluasi. Hasil dari penelitian ini adalah sebuah prototipe fungsional yang telah melalui uji internal, di mana seluruh fitur utama termasuk mekanisme puzzle interaktif (*Drag & Drop*, *Swap & Rotate*), penyajian materi, serta kerangka evaluasi (kuis dan kuesioner) beroperasi dengan baik dan siap untuk validasi eksternal.

Kata kunci : *citra digital, media pembelajaran, pengolahan citra, puzzle, SmartPixel.*

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan kemajuan pesat teknologi pencitraan, pengolahan citra digital telah menjadi salah satu bidang yang esensial dalam berbagai aspek kehidupan modern [1]. Citra tidak lagi hanya berfungsi sebagai media informasi visual, tetapi juga merupakan komponen multimedia fundamental yang memegang peranan sangat penting [2], [3]. Namun, di balik kemudahan menikmati konten visual, terdapat konsep-konsep dasar yang kompleks seperti piksel, resolusi, transformasi geometri, dan model warna, yang menjadi fondasi dari setiap citra digital yang kita lihat. Pemahaman mendalam terhadap konsep-konsep ini sangat krusial, terutama bagi pelajar di tingkat pendidikan menengah yang mulai memasuki bidang ilmu komputer dan informatika.

Tantangan utama yang sering dihadapi dalam proses pembelajaran konsep citra digital adalah sifatnya yang abstrak. Banyak siswa, khususnya pada jenjang SMP-SMA, mengalami kesulitan dalam memahami bagaimana sebuah gambar tersusun dan dimanipulasi secara digital ketika materi hanya disampaikan secara teoretis. Proses pembelajaran yang cenderung berorientasi pada guru (teacher-centered) dan bersifat monoton sering kali membuat siswa kurang mandiri dan kreatif dalam memecahkan masalah. Akibatnya, siswa mungkin mampu menghafal definisi, tetapi gagal menangkap makna dan aplikasi praktis dari konsep yang dipelajari, sehingga informasi yang diterima menjadi kurang bermakna [4].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan sebuah pendekatan pembelajaran inovatif yang dapat menjembatani antara teori dan praktik. Pembelajaran aktif melalui pengalaman langsung

(learning by doing) terbukti lebih efektif dibandingkan metode pasif. Salah satu implementasinya adalah melalui media pembelajaran interaktif berbasis permainan edukatif seperti puzzle [5]. Puzzle dapat melatih kreativitas, keteraturan, konsentrasi, serta kemampuan pemecahan masalah [6]. Dengan mengintegrasikan materi ke dalam format puzzle, siswa diajak untuk secara langsung memanipulasi objek digital, sehingga dapat membangun pemahaman yang lebih kuat dan konkret [5]. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip pembelajaran kontekstual, di mana siswa didorong untuk menghubungkan materi yang dipelajari dengan situasi di dunia nyata [4].

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengembangkan SmartPixel, sebuah media pembelajaran interaktif berbasis web yang dirancang khusus untuk membantu siswa SMP-SMA memahami konsep-konsep fundamental citra digital. Melalui serangkaian modul puzzle visual yang mencakup konsep piksel dan resolusi, transformasi geometri, serta model warna RGB dan grayscale, SmartPixel memfasilitasi proses belajar sambil melakukan (learning by doing) [7]. Diharapkan, SmartPixel dapat menjadi alat bantu yang efektif dan menyenangkan, serta meningkatkan pemahaman dan minat siswa terhadap dunia pengolahan citra digital.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Konsep Citra Digital dan Tantangannya dalam Pembelajaran

Citra digital terdiri atas susunan elemen terkecil yang disebut piksel, dengan atribut tertentu seperti intensitas dan warna.[8]. pemahaman terhadap struktur piksel dan resolusi sangat penting dalam pembelajaran pengolahan citra, karena merupakan dasar dari proses

visualisasi digital. Namun, penyampaian materi secara konvensional sering tidak mampu mengilustrasikan keterkaitan antara teori dan implementasi nyata. Hal ini menyebabkan siswa kesulitan dalam menginternalisasi konsep abstrak citra digital.

2.2. Media Interaktif sebagai Solusi Pembelajaran Konseptual

Pendekatan berbasis media interaktif telah banyak digunakan dalam pendidikan untuk memvisualisasikan proses yang kompleks [9]. menunjukkan bahwa penggunaan media interaktif berbasis visual dapat meningkatkan daya serap siswa hingga 30% dibandingkan metode ceramah biasa. Visualisasi langsung membuat konsep abstrak seperti transformasi citra, model warna RGB dan grayscale menjadi lebih mudah dipahami.

2.3. Puzzle Edukatif dalam Konteks Gamifikasi Pembelajaran

Puzzle sebagai media edukatif berfungsi ganda: melatih logika spasial dan menyampaikan konten pembelajaran secara terselubung. gamifikasi berbasis puzzle dapat meningkatkan keterlibatan siswa dan pemahaman konseptual secara simultan. Implementasi puzzle dalam pembelajaran citra digital mempertemukan sisi logis (susun ulang kepingan) dan pemahaman konseptual (struktur dan transformasi gambar), menjadikan pembelajaran lebih kontekstual dan bermakna [10].

2.4. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang dilakukan [11] mengimplementasikan media puzzle maker untuk mengukur dampaknya terhadap perkembangan kognitif siswa sekolah dasar. Penelitian tersebut menemukan bahwa penggunaan media puzzle membawa dampak positif, seperti meningkatkan antusiasme siswa dalam belajar dan mempermudah pemahaman materi. Hasilnya menunjukkan peningkatan hasil belajar siswa secara signifikan, dengan tingkat ketuntasan yang naik dari 30.44% menjadi 78.26% setelah penerapan media puzzle.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengadopsi pendekatan Penelitian dan Pengembangan (R&D) dengan fokus pada pengembangan media pembelajaran interaktif berbasis web. Tahapan metodologi yang digunakan disesuaikan untuk menghasilkan prototipe SmartPixel yang fungsional dan teruji secara internal, serta merencanakan kerangka evaluasi empiris di masa depan.

Tahapan Penelitian:

- Tahap Analisis Kebutuhan: Tahap ini diawali dengan studi literatur untuk memahami kesulitan siswa SMP-SMA dalam memahami konsep citra digital, dilanjutkan dengan identifikasi konsep-konsep kunci yang akan diajarkan seperti pixel, resolusi, transformasi, dan model warna citra.

Analisis juga dilakukan terhadap karakteristik target audiens (siswa SMP-SMA) dan preferensi belajar mereka terhadap media interaktif untuk memastikan relevansi desain.



Gambar 1. Flowchart metode penelitian dan pengembangan smartpixel

- Tahap Perancangan (Design): Pada tahap perancangan, dilakukan desain arsitektur sistem menggunakan teknologi web standar (HTML, CSS, JavaScript). Fokus utama perancangan adalah pada antarmuka pengguna (UI) dan pengalaman pengguna (UX) yang intuitif dan menarik. Selain itu, dirancang juga modul puzzle interaktif dengan jenis interaksi drag & drop serta swap & rotate, materi pembelajaran kontekstual yang terintegrasi, dan instrumen evaluasi yang meliputi pre-test, post-test, kuesioner persepsi pengguna, serta sistem pencatatan log interaksi.
- Tahap Pengembangan (Development): Implementasi kode frontend (HTML, CSS, JavaScript) dilakukan berdasarkan rancangan yang telah dibuat. Tahap ini mencakup integrasi fitur unggah gambar dan pemrosesan citra (pemotongan dan konversi grayscale), pengembangan logika puzzle dan fitur auto-solve, serta pengintegrasian materi pembelajaran dengan dukungan rendering

rumus matematika menggunakan MathJax. Sistem pencatatan data internal (userData) juga diimplementasikan untuk merekam metrik interaksi.

- d. Tahap Implementasi / Uji Fungsionalitas: Dalam tahap ini, sistem SmartPixel diterapkan di lingkungan web. Uji coba fungsionalitas internal dilakukan secara menyeluruh oleh pengembang untuk memastikan bahwa semua fitur berjalan sesuai rencana dan tidak terdapat bug signifikan. Pengecekan kompatibilitas di berbagai peramban web juga dilakukan untuk menjamin aksesibilitas yang luas.
- e. Tahap Evaluasi (Perencanaan): Tahap akhir ini berfokus pada perancangan detail untuk evaluasi empiris di masa depan. Ini meliputi perencanaan pengumpulan data dari partisipan (melalui pre-test, interaksi puzzle, post-test, dan kuesioner), serta metodologi analisis data (kuantitatif untuk skor tes, waktu, dan jumlah aksi; kualitatif untuk respons kuesioner terbuka jika diterapkan). Hasil dari tahap ini akan menjadi dasar untuk menarik kesimpulan dan memberikan saran pengembangan lanjutan setelah studi empiris dilakukan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini berfokus pada perancangan dan pengembangan SmartPixel: Media Pembelajaran Interaktif Konsep Citra Digital, sebuah aplikasi berbasis web yang bertujuan untuk memfasilitasi pemahaman siswa SMP-SMA terhadap konsep-konsep fundamental dalam pengolahan citra digital. Desain sistem ini menitikberatkan pada pendekatan pembelajaran aktif melalui puzzle visual interaktif yang didukung oleh materi kontekstual.

4.1 Hasil Uji Fungsionalitas Sistem dan Potensi Pembelajaran

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, SmartPixel beroperasi sesuai dengan rancangan yang telah ditetapkan. Transisi antar halaman berjalan lancar, dan fungsi unggah gambar (JPG/PNG) serta pemotongan otomatis menjadi persegi berfungsi dengan baik. Dalam mekanisme puzzle, Puzzle 1 (Drag & Drop) memungkinkan potongan puzzle ditarik dan diletakkan secara akurat di slot target, sementara Puzzle 2 & 3 (Swap & Rotate) menunjukkan bahwa interaksi klik sekali untuk memilih/menukar dan double klik untuk memutar kepingan berfungsi dengan benar, dan fitur "Auto Solve" juga berjalan sesuai spesifikasi. Penyajian materi pembelajaran tampil dengan baik setelah setiap puzzle selesai, termasuk rendering rumus matematika oleh MathJax. Kuis (pre-test dan post-test) serta kuesioner persepsi pengguna ditampilkan dengan benar, dan pilihan jawaban dapat dipilih serta

dievaluasi. Terakhir, kerangka pencatatan data interaksi pengguna (waktu penyelesaian puzzle, jumlah aksi, skor tes, dan respons kuesioner) telah berhasil diimplementasikan dalam variabel userData dan ditampilkan di konsol peramban, menunjukkan kesiapan untuk pengumpulan data empiris.

Secara keseluruhan, SmartPixel berfungsi secara fungsional sesuai dengan perancangan dan siap untuk tahap pengujian dengan pengguna yang sesungguhnya. Meskipun data empiris dari pengguna belum tersedia, desain SmartPixel secara teoritis memiliki potensi besar untuk meningkatkan pemahaman konsep.

- a. Potensi Peningkatan Pemahaman: Pendekatan "belajar sambil melakukan" diharapkan dapat membantu siswa membangun pemahaman yang lebih kuat dibandingkan pembelajaran pasif. Desain pre-test dan post-test telah disiapkan untuk mengukur potensi peningkatan ini di masa mendatang.
- b. Potensi Efisiensi Pembelajaran: Pencatatan metrik interaksi seperti waktu penyelesaian dan jumlah aksi (percobaan swap/rotasi/penempatan) akan memberikan wawasan tentang tingkat kesulitan relatif setiap modul dan bagaimana siswa berinteraksi dengan puzzle. Data ini diharapkan dapat mengidentifikasi area yang mungkin memerlukan penyempurnaan desain puzzle.
- c. Prospek Pengalaman Pengguna: Desain antarmuka pengguna (UI) dan pengalaman pengguna (UX) SmartPixel telah dioptimalkan untuk membuat aplikasi menarik dan intuitif. Penggunaan gradien warna yang lembut, tombol yang responsif, dan layout yang bersih bertujuan untuk menciptakan pengalaman belajar yang menyenangkan, yang diharapkan dapat menghasilkan persepsi pengguna yang positif.

4.2 Analisis Desain Pedagogis dan Interaktif SmartPixel

SmartPixel dibangun di atas prinsip pembelajaran aktif (learning by doing) dan visual, yang relevan untuk target audiens SMP-SMA yang cenderung lebih responsif terhadap metode belajar berbasis pengalaman [2]. Pendekatan berbasis puzzle memaksa siswa untuk secara langsung memanipulasi representasi visual dari konsep-konsep abstrak.

- a. Modul Puzzle 1 (Pixel & Resolusi): Dengan mekanisme drag & drop, siswa diajak untuk secara intuitif memahami bagaimana gambar digital tersusun dari unit-unit terkecil (piksel). Visualisasi "pixel zoom" setelah puzzle selesai semakin memperkuat pemahaman tentang granularitas gambar.

Puzzle #1: Menyusun Dasar Citra

Susunlah potongan gambar di area target. Setelah selesai, pahami konsep Pixel dan Resolusi!

Waktu: 5s

AUTO SOLVE



Mengenal Pixel dan Resolusi: Fondasi Citra Digital

Selamat! Anda telah berhasil menyusun kepingan-kepingan gambar. Setiap kepingan, dan gambar secara keseluruhan, tersusun dari elemen-elemen dasar yang sangat kecil.

Pixel (Picture Element)

Pixel adalah unit terkecil yang membentuk sebuah gambar digital pada layar atau sensor kamera. Bayangkan sebuah mozaik raksasa yang tersusun dari jutaan ubin kecil; setiap ubin tersebut adalah analogi dari pixel. Setiap pixel memiliki nilai warna atau intensitas cahaya tertentu.

- **Warna dan intensitas:** Pada gambar berwarna, setiap pixel biasanya merepresentasikan kombinasi dari tiga warna dasar (Merah, Hijau, Biru - RGB) atau pada gambar grayscale, ia merepresentasikan satu tingkat keabuan.
- **Kepadatan Pixel:** Semakin banyak pixel yang terkandung dalam suatu area tertentu (kepadatan pixel), semakin detail dan halus gambar yang ditampilkan. Ini sering diukur dalam PPI (Pixels Per Inch) untuk layar.
- **Bit Depth:** Jumlah bit yang digunakan untuk merepresentasikan warna setiap pixel menentukan berapa banyak variasi warna yang dapat ditampilkan. Misalnya:
 - 1-bit: Hanya 2 warna (biasanya hitam dan putih).
 - 8-bit (grayscale): $2^8 = 256$ tingkat keabuan.
 - 24-bit (True Color RGB): 8 bit per channel warna (R, G, B), menghasilkan 2^{24} approx 16,7 juta warna.

Contoh Pixel dari Gambar Puzzle:



Gambar 2. Tampilan modul puzzle 1 (pixel & resolusi) saat berinteraksi

- b. Modul Puzzle 2 (Transformasi Geometri): Melalui interaksi swap & rotate pada kepingan puzzle, siswa secara langsung mengaplikasikan konsep translasi (pergeseran posisi elemen) dan rotasi (perputaran elemen). Ini memberikan pengalaman konkret terhadap operasi yang seringkali hanya diajarkan secara teoritis, sejalan dengan pentingnya pembelajaran kontekstual [4].

Puzzle #2: Transformasi dan Pengenalan Objek

Klik 1x untuk memilih kepingan pertama, lalu klik kepingan lain untuk menukar posisinya. Klik kiri 2x pada kepingan untuk memutar 90 derajat.

Waktu: 1s

AUTO SOLVE



Klik 1x untuk memilih, klik kepingan lain untuk menukar. Klik kiri 2x untuk memutar.

Transformasi Geometri dan Konsep Segmentasi Citra

Anda baru saja menyelesaikan puzzle dengan cara menukar dan memutar kepingan. Proses ini secara langsung berkaitan dengan konsep penting dalam pengolahan citra, yaitu **transformasi geometri dan segmentasi citra**.

Transformasi Geometri

Transformasi geometri adalah operasi yang mengubah posisi, orientasi, atau ukuran objek (dalam hal ini, kepingan puzzle) dalam sebuah citra. Beberapa transformasi dasar yang relevan dengan apa yang baru saja Anda lakukan meliputi:

- **Translasi (Pergeseran):** Ini terjadi ketika Anda menukar posisi dua kepingan puzzle. Secara matematis, translasi adalah pemindahan setiap titik objek sejauh vektor tertentu (t_x, t_y) . Jika sebuah titik awal adalah (x, y) , maka setelah translasi menjadi (x', y') dimana:

$$\begin{aligned} x' &= x + t_x \\ y' &= y + t_y \end{aligned}$$

- **Rotasi (Perputaran):** Ini terjadi ketika Anda memutar sebuah kepingan puzzle. Rotasi dilakukan terhadap suatu titik pivot (biasanya pusat kepingan) dengan sudut tertentu (θ derajat). Untuk rotasi terhadap titik asal $(0,0)$, koordinat baru (x', y') dari titik (x, y) adalah:

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \theta - y \sin \theta \\ y' &= x \sin \theta + y \cos \theta \end{aligned}$$

- **Penskalaan (Scaling):** Meskipun tidak secara langsung Anda lakukan, penskalaan adalah transformasi untuk mengubah ukuran objek. Ini bisa uniform (semua sumbu diskalakan sama) atau non-uniform.
- **Geseran (Shearing):** Transformasi yang memiringkan objek, seolah-olah lapisan-lapisan objek digeser satu sama lain.

Transformasi-transformasi ini seringkali direpresentasikan menggunakan matriks dan merupakan dasar dari banyak operasi grafis komputer dan pengolahan citra.

Gambar 3. Tampilan modul puzzle 2 (transformasi geometri) saat berinteraksi

- c. Modul Puzzle 3 (Grayscale & RGB): Penggunaan gambar grayscale sebagai objek puzzle mendorong pemahaman tentang representasi warna dan konversi citra. Perbandingan visual antara versi RGB dan grayscale setelah puzzle, didukung oleh penjelasan formula, membantu siswa memahami perbedaan mendasar antara kedua model warna tersebut.

Puzzle #3: Pesona Skala Keabuan (Grayscale)



Klik 1x untuk memilih kepingan pertama, lalu klik kepingan lain untuk menukar posisinya. Klik kiri 2x pada kepingan untuk memutar 90 derajat.

Waktu: 0s

AUTO SOLVE



Klik 1x untuk memilih, klik kepingan lain untuk menukar. Klik kiri 2x untuk memutar.

Memahami Grayscale dan Model Warna RGB

Puzzle terakhir ini Anda selesaikan menggunakan versi gambar dalam skala keabuan (grayscale). Ini adalah salah satu cara representasi citra yang umum, berbeda dengan gambar berwarna yang biasanya menggunakan model RGB.

Citra Grayscale (Skala Keabuan)

Citra **grayscale** adalah gambar digital di mana nilai setiap pixel hanya merepresentasikan informasi intensitas cahaya (luminansi), tanpa informasi warna. Ini berarti setiap pixel adalah sebuah bayangan abu-abu, mulai dari hitam pekat (intensitas terendah) hingga putih bersih (intensitas tertinggi).

- **Satu Channel:** Berbeda dengan gambar berwarna yang mungkin memiliki beberapa channel (misalnya, 3 channel untuk RGB), gambar grayscale hanya memiliki satu channel data per pixel.
- **Representasi Intensitas:** Jika menggunakan 8-bit per pixel (yang umum), gambar grayscale dapat menampilkan $2^8 = 256$ tingkat keabuan yang berbeda (nilai dari 0 hingga 255).
- **Konversi dari RGB ke Grayscale:** Untuk mengubah gambar berwarna (RGB) menjadi grayscale, salah satu metode yang paling umum adalah dengan menghitung rata-rata berbobot dari komponen Merah (R), Hijau (G), dan Biru (B). Formula yang sering digunakan adalah:

$$\text{Luminance} = 0.299\text{R} + 0.587\text{G} + 0.114\text{B}$$

Pembobotan ini dilakukan karena mata manusia lebih sensitif terhadap warna hijau dibandingkan warna lainnya. Ada juga metode lain seperti mengambil rata-rata sederhana $((R + G + B)/3)$ atau hanya menggunakan channel hijau.

Aplikasi:

- Mengurangi kompleksitas data untuk analisis citra.
- Beberapa teknik pencetakan atau tampilan monokromatik.
- Efek artistik dalam fotografi.
- Tahap pra-pemrosesan dalam beberapa algoritma computer vision.

Gambar 4. Tampilan modul puzzle 3 (grayscale & rgb) saat berinteraksi

Materi pembelajaran yang disajikan setelah setiap puzzle berfungsi sebagai penguatan teori setelah praktik, membantu siswa mengaitkan pengalaman interaktif mereka dengan definisi dan formula ilmiah. Integrasi analogi sederhana dan contoh relevan (seperti "ubin mozaik" untuk pixel atau "filter foto" untuk segmentasi) bertujuan untuk menjembatani kesenjangan antara teori dan aplikasi dunia nyata, sesuai dengan kebutuhan siswa SMP-SMA.

Subjek pengujian yang direncanakan dalam studi ini adalah siswa tingkat SMP dan SMA yang belum mengetahui materi citra digital. Evaluasi terhadap efektivitas media pembelajaran SmartPixel akan dilakukan melalui beberapa instrumen, yaitu pre-test dan post-test untuk mengukur peningkatan pemahaman konsep setelah menggunakan aplikasi, kuesioner persepsi pengguna untuk menilai kenyamanan, kemudahan penggunaan, dan tingkat

keterlibatan selama proses pembelajaran, serta analisis log interaksi seperti durasi penyelesaian puzzle dan jumlah percobaan aksi (swap atau rotasi) untuk menilai efektivitas desain puzzle. Data pre-test dan post-test akan dianalisis secara kuantitatif untuk mengukur peningkatan skor sebagai indikator pemahaman, sementara data log interaksi digunakan untuk mengidentifikasi efisiensi dan potensi kesulitan dalam penggunaan aplikasi. Selain itu, hasil kuesioner akan dianalisis secara deskriptif guna menangkap persepsi subjektif pengguna terhadap pengalaman belajar menggunakan SmartPixel. Hasil dari perencanaan ini akan menjadi landasan bagi pengujian lebih lanjut di masa mendatang guna memastikan efektivitas media ini dalam konteks pembelajaran nyata.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

SmartPixel telah sukses dikembangkan sebagai prototipe media pembelajaran interaktif berbasis web yang berfungsi penuh, dengan semua fitur utama seperti navigasi, unggah gambar, puzzle interaktif (Drag & Drop, Swap & Rotate), materi kontekstual, serta kuis dan kuesioner yang telah teruji secara internal dan beroperasi sesuai desain, menunjukkan kesiapannya untuk validasi eksternal. Desainnya yang berfokus pada pendekatan pembelajaran aktif dan visual berpotensi besar meningkatkan pemahaman siswa SMP-SMA terhadap konsep pengolahan citra digital, menawarkan model pembelajaran interaktif berbasis gamifikasi yang pedagogis serta kerangka sistematis untuk pengumpulan data interaksi dan evaluasi pembelajaran. Mengingat potensi besar ini, langkah krusial selanjutnya adalah melakukan validasi empiris dengan partisipasi riil untuk mengonfirmasi efektivitas SmartPixel dalam lingkungan belajar sesungguhnya, memanfaatkan kerangka data yang telah dirancang untuk studi empiris di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Ashillah, S. A. Gulo, Y. Rahmi, D. Y. Niska, and S. A. Gulo, "Implementasi Algoritma Pengolahan Citra Digital untuk Perbaikan Kualitas Gambar," *Jurnal Sistem Komputer dan Kecerdasan Buatan*, vol. 8, pp. 274–280, 2025.
- [2] E. Renaldo, M. F. R. P. Pratama, M. Y. Setiawan, and F. Prasetya, "Operasi Titik pada Pengolahan Citra Digital untuk Peningkatan Kualitas Gambar Menggunakan MATLAB," in *MDP Student Conference (MSC)*, 2022, pp. 201–205.
- [3] K. Kusnadi and D. A. S. P. Atmaja, "Implementation of Grayscale Image Transformation and Histogram Equalization Methods in Digital Image Processing," *Jurnal Krisnadana (Jurnal Komputer, Sistem Kendali & Jaringan)*, vol. 4, no. 2, pp. 111–121, 2025.
- [4] N. Nursarofah, "Meningkatkan Kualitas Pendidikan Anak Usia Dini melalui Pembelajaran Kontekstual dengan Pendekatan

- Merdeka Belajar,” *Jurnal Pendidikan Anak Usia Dini*, vol. 1, no. 1, 2022.
- [5] R. F. A. Ginting and F. E. Messe, “Pengembangan Game Edukasi Puzzle Berbasis Computer Vision Hand Tracking untuk Anak Usia Dini,” *HOAQ (High Education of Organization Archive Quality): Jurnal Teknologi Informasi*, vol. 16, no. 1, pp. 16–22, 2025.
- [6] R. H. Agustinus, “Deteksi Dominasi Warna Potongan Citra Sebagai Mesin Puzzle Digital,” *JIFOTECH (Journal of Information Technology)*, vol. 2, 2022.
- [7] R. Ardiana, “Pembelajaran Berbasis Kecerdasan Majemuk dalam Pendidikan Anak Usia Dini,” *Murhum : Jurnal Pendidikan Anak Usia Dini*, pp. 1–12, Feb. 2022, doi: 10.37985/murhum.v3i1.65.
- [8] A. Widiarti and R. Widodo, “Analisis Pemahaman Siswa terhadap Konsep Piksel dan Resolusi dalam Pengolahan Citra Digital,” *Jurnal Teknologi dan Pembelajaran Digital*, vol. 5, no. 2, pp. 88–95, 2023.
- [9] D. Prasetyo and S. Wahyuni, “Penerapan Media Interaktif Visual dalam Pembelajaran Konsep Model Warna,” in *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Komunikasi*, 2024, pp. 150–155.
- [10] L. Rahmadani, H. Nurfadhilah, and F. Lestari, “Gamifikasi dalam Pembelajaran Sains Menggunakan Puzzle Interaktif Berbasis Web,” *Jurnal Pendidikan Informatika dan Sains*, vol. 10, no. 1, pp. 12–19, 2024.
- [11] I. Maufidhoh and I. Maghfirah, “IMPLEMENTASI PEMBELAJARAN BERBASIS ARTIFICIAL INTELLIGENCE MELALUI MEDIA PUZZLE MAKER PADA SISWA SEKOLAH DASAR,” *ABUYA: Jurnal Pendidikan Dasar*, vol. 1, no. 1, pp. 30–43, 2023.