

Gamifikasi Metaschool Berbasis Blockchain Offline untuk Pembelajaran di Daerah Terpencil

Aryanto*, Rafidto Farras Achdiar Azizul Haqqi, Ariq Hazel, Gita Rahmania, Bayu Dwi Setiawan
*Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung; Jl. Prof. Sumantri
 Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung 35145*

<i>Kata kunci:</i> blockchain offline gamifikasi Metaschool pembelajaran daerah terpencil kredensial terverifikasi  Copyright © JPI (Jurnal Profesi Insinyur Universitas Lampung).	Abstrak. Kesenjangan digital di daerah terpencil membuat banyak sekolah, termasuk SMK Negeri 1 Merbau Mataram, Lampung, menghadapi keterbatasan koneksi internet, rendahnya keterlibatan belajar, serta catatan pencapaian siswa yang sulit diverifikasi dan rentan dimanipulasi. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji Metaschool, yaitu platform pembelajaran tergamifikasi yang berjalan di jaringan lokal sekolah dan dipadukan dengan blockchain offline untuk mencatat pencapaian belajar secara aman. Metode yang digunakan adalah Design Science Research dengan model pengembangan ADDIE; prototipe dibangun pada jaringan lokal menggunakan ledger permissioned dengan konsensus Proof of Authority, fungsi hash SHA-256, dan Merkle root, kemudian disinkronkan ke node pusat ketika konektivitas tersedia. Pengujian fungsional black-box, pengukuran kinerja, uji integritas terhadap skenario manipulasi data, serta survei keterlibatan dilakukan dalam uji coba terbatas pada satu kelas siswa. Hasil menunjukkan sistem berjalan penuh tanpa internet, mampu mencatat transaksi pencapaian dengan latensi rendah, mendeteksi seluruh skenario manipulasi ledger yang diuji, dan menunjukkan peningkatan rata-rata skor keterlibatan siswa. Sinkronisasi append-only menjaga konsistensi catatan antara node lokal dan pusat. Temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi gamifikasi dan blockchain offline merupakan pendekatan yang layak untuk dikembangkan dalam peningkatan mutu dan kredibilitas pembelajaran di daerah terpencil.
--	--

1. Pendahuluan

Transformasi digital pendidikan belum dinikmati secara merata. Sekolah-sekolah di daerah tertinggal, terdepan, dan terluar (3T) masih menghadapi keterbatasan listrik, perangkat, dan terutama akses internet yang tidak stabil (UNESCO, 2023). SMK Negeri 1 Merbau Mataram di Kabupaten Lampung Selatan merupakan salah satu sekolah kejuruan yang berada pada kondisi serupa: jaringan

internet tersedia secara terbatas dan sering terputus, sehingga pemanfaatan platform pembelajaran daring konvensional menjadi tidak andal. Kondisi ini berdampak pada rendahnya keterlibatan belajar siswa serta pengelolaan catatan akademik yang masih manual, mudah hilang, dan sulit diverifikasi keasliannya oleh pihak ketiga seperti industri pengguna lulusan.

Gamifikasi, yaitu penerapan unsur-unsur permainan pada konteks non-permainan, telah banyak diteliti sebagai strategi untuk meningkatkan motivasi dan keterlibatan belajar (Hamari et al., 2014; Deterding et al., 2011). Tinjauan dan meta-analisis menunjukkan bahwa unsur seperti poin, lencana, dan papan peringkat dapat mendorong perilaku belajar yang lebih aktif, meskipun efektivitasnya bergantung pada konteks dan desain (Koivisto dan Hamari, 2019; Ratinho dan Martins, 2023). Sayangnya, sebagian besar implementasi gamifikasi pendidikan mengandalkan layanan daring dan tidak menyentuh persoalan keandalan serta kredibilitas catatan pencapaian yang dihasilkan.

Pada sisi lain, teknologi blockchain menawarkan buku besar yang tidak dapat diubah (immutable) untuk menyimpan dan memverifikasi kredensial akademik secara aman dan transparan (Nakamoto, 2008; Bapat, 2020). Tinjauan sistematis penerapan blockchain pada pendidikan menegaskan manfaatnya untuk anti-pemalsuan ijazah, transkrip, serta sertifikat mikro, sekaligus memberikan kepemilikan data kepada pemelajar (Alammery et al., 2019). Standar kredensial terverifikasi juga telah dikembangkan untuk mendukung interoperabilitas (W3C, 2022). Namun, hampir seluruh solusi tersebut mengasumsikan konektivitas yang memadai, sehingga sulit diterapkan di sekolah daerah terpencil.

Kesenjangan inilah yang menjadi fokus penelitian. Pertama, gamifikasi yang berdiri sendiri belum menjamin integritas dan keterverifikasian catatan belajar. Kedua, platform blockchain pendidikan yang ada umumnya bersifat daring penuh dan berbiaya sumber daya tinggi, misalnya jaringan permissioned yang menuntut infrastruktur stabil (Androulaki et al., 2018), sehingga kurang sesuai untuk daerah 3T. Ketiga, pendekatan yang memadukan gamifikasi dengan blockchain yang mengutamakan operasi luring (offline-first) (Kleppmann et al., 2019) dan ditujukan bagi sekolah kejuruan terpencil masih sangat jarang. Kebaruan penelitian ini terletak pada rancangan

Metaschool yang memadukan mesin gamifikasi dengan blockchain offline pada jaringan lokal sekolah, dilengkapi sinkronisasi periodik (anchoring) ke node pusat ketika koneksi tersedia.

Berdasarkan latar tersebut, penelitian ini menjawab tiga pertanyaan: (1) bagaimana merancang sistem pembelajaran tergamifikasi berbasis blockchain offline yang sesuai untuk SMK di daerah terpencil; (2) apakah sistem dapat berfungsi penuh tanpa internet dengan kinerja dan integritas data yang memadai; serta (3) bagaimana dampaknya terhadap keterlibatan belajar siswa. Kontribusi utama mencakup arsitektur dan prototipe Metaschool, mekanisme pencatatan pencapaian berbasis blockchain luring beserta skema sinkronisasinya, dan bukti awal kelayakannya melalui pengujian pada satu kelas di SMK Negeri 1 Merbau Mataram.

2. Tinjauan Pustaka

Gamifikasi dalam Pendidikan

Gamifikasi didefinisikan sebagai penggunaan elemen desain permainan dalam konteks non-permainan untuk mendorong keterlibatan dan perilaku tertentu (Deterding et al., 2011). Dalam pendidikan, elemen yang umum digunakan adalah poin pengalaman (XP), level, lencana (badge), papan peringkat, dan misi. Tinjauan empiris menunjukkan dampak positif terhadap motivasi dan keterlibatan, namun menekankan bahwa hasilnya kontekstual (Hamari et al., 2014; Koivisto dan Hamari, 2019; Ratinho dan Martins, 2023). Teori Determinasi Diri menjelaskan bahwa motivasi tumbuh ketika kebutuhan akan otonomi, kompetensi, dan keterhubungan terpenuhi (Ryan dan Deci, 2000), sehingga rancangan gamifikasi sebaiknya tidak sekadar memberi hadiah eksternal.

Blockchain dan Buku Besar Terdistribusi

Blockchain adalah buku besar terdistribusi yang menyusun transaksi ke dalam blok-blok yang saling terhubung melalui nilai hash blok sebelumnya, sehingga membentuk rantai yang sulit diubah (Nakamoto, 2008). Integritas himpunan transaksi dalam satu blok diringas

menggunakan pohon Merkle (Merkle, 1988), sedangkan keamanan kriptografis bergantung pada fungsi hash standar seperti SHA-256 (National Institute of Standards and Technology, 2015). Pada jaringan permissioned, hanya node tepercaya yang boleh memvalidasi, sehingga mekanisme konsensus dapat lebih ringan dibanding Proof of Work (Androulaki et al., 2018).

Blockchain Offline dan Sinkronisasi Data

Paradigma perangkat lunak local-first menempatkan data utama pada perangkat pengguna dan tetap berfungsi tanpa koneksi, lalu menyinkronkan perubahan ketika jaringan tersedia (Kleppmann et al., 2019). Prinsip ini relevan untuk daerah terpencil: ledger dapat dioperasikan secara luring pada node lokal dan kemudian ditambatkan (anchored) ke node pusat melalui sinkronisasi append-only. Karena catatan bersifat hanya-tambah dan setiap blok terikat hash, penggabungan riwayat antar-node dapat dilakukan tanpa konflik selama urutan dan keterkaitan hash terjaga.

Kredensial Akademik Terverifikasi

Verifikasi kredensial akademik secara tradisional lambat, manual, dan rawan pemalsuan. Pendekatan berbasis blockchain memungkinkan penerbitan kredensial dengan tanda kriptografis yang dapat diverifikasi dalam hitungan detik tanpa perantara (Bapat, 2020; Alammery et al., 2019). Model data kredensial terverifikasi mendukung representasi yang interoperabel dan dapat dibawa oleh pemelajar (W3C, 2022). Dalam konteks SMK, pencapaian seperti penyelesaian modul kompetensi dan sertifikat mikro dapat dicatat sebagai transaksi sehingga keasliannya mudah dibuktikan kepada dunia industri.

Konsep Metaschool dan Pembelajaran Daerah Terpencil

Metaschool dalam penelitian ini dipahami sebagai lingkungan belajar digital tergamifikasi yang menyatukan konten, tantangan, dan penghargaan dalam satu ekosistem yang berjalan di jaringan lokal sekolah. Konsep ini menanggapi tantangan pendidikan daerah 3T yang menuntut solusi hemat sumber daya dan tidak bergantung pada internet (UNESCO,

2023). Penelitian terdahulu di lingkungan Universitas Lampung menunjukkan bahwa teknologi digital dapat diterapkan untuk mendukung layanan akademik berbasis lokasi, misalnya augmented reality untuk navigasi perpustakaan (Mardiana et al., 2022). Meskipun konteksnya berbeda, temuan tersebut menunjukkan peluang pengembangan solusi digital lokal yang disesuaikan dengan kebutuhan institusi pendidikan.

3. Metode Penelitian

Rancangan Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan Design Science Research (DSR) yang berorientasi pada perancangan dan evaluasi artefak (Peppers et al., 2007), dipadukan dengan model pengembangan instruksional ADDIE yang terdiri atas tahap Analysis, Design, Development, Implementation, dan Evaluation (Branch, 2009). Tahap analisis mengidentifikasi kebutuhan sekolah dan keterbatasan konektivitas; tahap desain menyusun arsitektur sistem, model gamifikasi, dan skema blockchain; tahap pengembangan membangun prototipe; tahap implementasi menerapkannya pada jaringan lokal sekolah; dan tahap evaluasi menguji fungsionalitas, kinerja, integritas, serta keterlibatan siswa.

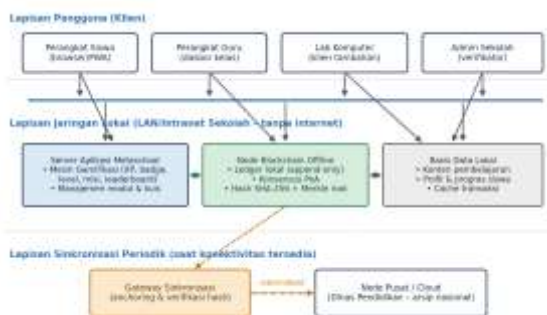
Lokasi dan Partisipan

Uji coba dilakukan di SMK Negeri 1 Merbau Mataram, Lampung Selatan. Partisipan adalah satu kelas yang berjumlah 32 siswa beserta dua orang guru pengampu sebagai operator dan validator. Periode implementasi berlangsung selama empat minggu pada satu mata pelajaran produktif. Uji coba ini merupakan studi awal dengan cakupan terbatas, sehingga temuan tidak dimaksudkan untuk digeneralisasi ke seluruh sekolah di daerah 3T tanpa validasi lanjutan. Pelaksanaan uji coba dilakukan dengan izin pihak sekolah, dan identitas siswa dijaga dalam proses pengumpulan serta pelaporan data.

Arsitektur Sistem Metaschool

Arsitektur sistem terdiri atas tiga lapisan, yaitu lapisan pengguna (klien), lapisan jaringan lokal, dan lapisan sinkronisasi periodik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.

Klien berupa Progressive Web App (PWA) yang diakses melalui peramban siswa dan guru di dalam jaringan lokal. Lapisan jaringan lokal memuat server aplikasi Metaschool (mesin gamifikasi dan manajemen konten), node blockchain offline, serta basis data lokal. Lapisan sinkronisasi menambatkan ledger lokal ke node pusat melalui gateway ketika koneksi internet tersedia.



Gambar 1. Arsitektur tiga lapisan sistem Metaschool berbasis blockchain offline.

Rancangan Blockchain Offline

Ledger dirancang sebagai blockchain permissioned dengan konsensus Proof of Authority (PoA), karena jumlah node terbatas dan terpercaya sehingga validasi menjadi ringan dan hemat daya (Androulaki et al., 2018). Setiap blok memuat indeks, stempel waktu, hash blok sebelumnya, Merkle root dari himpunan transaksi, identitas validator, dan hash blok itu sendiri (Gambar 2). Hash blok dihitung dengan SHA-256 (National Institute of Standards and Technology, 2015) mengikuti Persamaan (1), sedangkan Merkle root dihitung secara rekursif mengikuti Persamaan (2).

$$H_i = \text{SHA-256}(H_{i-1} \parallel t_i \parallel \text{MR}_i \parallel v_i) \quad (1)$$

$$H_{\text{parent}} = \text{SHA-256}(H_{\text{left}} \parallel H_{\text{right}}) \quad (2)$$

Pencapaian belajar (penyelesaian modul, perolehan XP, lencana, dan sertifikat mikro) direkam sebagai transaksi. Algoritme pencatatan dan perhitungan poin ditunjukkan pada Kode Program 1.

Kode Program 1. Struktur blok dan pencatatan pencapaian (pseudokode).

```
class Block:
    def __init__(self, index, prev_hash, txs, validator):
        self.index = index
        self.timestamp = now()
        self.prev_hash = prev_hash
        self.txs = txs # daftar pencapaian
        self.merkle_root = merkle(txs) # Persamaan (2)
        self.validator = validator # PoA: guru/admin
        self.hash = self.compute_hash()
```

```
def compute_hash(self): # Persamaan (1)
    head = f'{self.index}{self.timestamp}{self.prev_hash}' \
           f'{self.merkle_root}{self.validator}'
    return sha256(head)

def award_xp(activities): # Persamaan (3)
    return sum(a.weight * a.completion * a.quality
               for a in activities)

def record_achievement(chain, pending, student, activity, xp):
    pending.append({'student': student, 'activity': activity,
                   'xp': xp, 'ts': now()})
    if len(pending) >= BLOCK_SIZE:
        blk = Block(len(chain), chain[-1].hash, pending[:],
                    local_validator())
        local_validator()
    if is_valid(blk, chain): # cek hash & otoritas PoA
        chain.append(blk); pending.clear()
```

Mekanisme Gamifikasi

Mesin gamifikasi menerapkan poin pengalaman (XP), level, lencana, papan peringkat, dan misi mingguan. Poin dihitung dari bobot aktivitas, status penyelesaian, dan skor kualitas mengikuti Persamaan (3), sedangkan level ditentukan dari akumulasi XP mengikuti Persamaan (4). Rancangan ini mengacu pada prinsip Determinasi Diri agar penghargaan mendukung kompetensi dan otonomi, bukan sekadar imbalan eksternal (Deterding et al., 2011; Ryan dan Deci, 2000).

$$XPs = \sum (w_a \cdot c_a \cdot q_a) \quad (3)$$

$$L = \lfloor \sqrt{(XP / k)} \rfloor \quad (4)$$

Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Data dikumpulkan melalui empat cara. Pertama, pengujian fungsional black-box untuk memastikan setiap fitur bekerja sesuai spesifikasi. Kedua, pengukuran kinerja meliputi latensi pencatatan transaksi, waktu pembentukan dan validasi blok, throughput, waktu replikasi antar-node, dan waktu sinkronisasi ke node pusat. Ketiga, uji integritas dilakukan dengan skenario manipulasi data ledger, seperti perubahan nilai XP dan perubahan isi transaksi, untuk menguji ketahanan rantai hash. Keempat, survei keterlibatan siswa dilakukan sebelum dan sesudah intervensi pada lima dimensi, yaitu kehadiran aktif, penyelesaian tugas, partisipasi diskusi, motivasi belajar, dan penyelesaian modul. Skor tiap dimensi dinormalisasi ke rentang 0–100. Data kuantitatif dianalisis secara deskriptif, dan peningkatan keterlibatan dihitung dengan gain ternormalisasi mengikuti Persamaan (5).

$$g = (\text{skorpasca} - \text{skorpra}) / (100 - \text{skorpra}) \quad (5)$$

4. Hasil dan Pembahasan

Implementasi Sistem

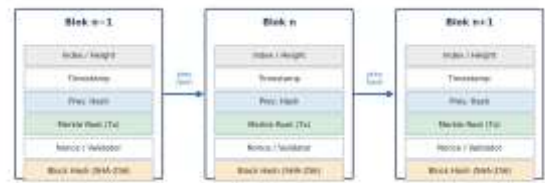
Prototipe Metaschool berhasil dibangun dan dijalankan pada jaringan lokal sekolah tanpa memerlukan internet. Antarmuka klien diimplementasikan sebagai PWA sehingga dapat diakses dari beragam perangkat dan tetap berfungsi dalam mode luring. Node aplikasi dan node blockchain berjalan pada mini-PC berdaya rendah yang terhubung melalui titik akses Wi-Fi lokal. Spesifikasi dan teknologi komponen sistem dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Komponen dan teknologi prototipe Metaschool.

Komponen	Spesifikasi / Teknologi
Server aplikasi & node	Mini-PC / Raspberry Pi 4 (RAM 4 GB), sistem operasi Linux
Backend & mesin gamifikasi	Python (Flask) / Node.js, antarmuka REST API
Antarmuka klien	Progressive Web App (HTML, CSS, JavaScript), mode luring
Ledger blockchain	Permissioned, konsensus PoA, SHA-256, pohon Merkle
Basis data lokal	SQLite (konten, profil, progres, cache transaksi)
Jaringan	LAN/Wi-Fi lokal melalui access point, tanpa internet
Sinkronisasi	Gateway append-only dengan verifikasi hash (berkala)

Struktur Blok dan Pencatatan Pencapaian

Setiap pencapaian siswa direkam sebagai transaksi dan dikelompokkan ke dalam blok yang saling terhubung melalui hash blok sebelumnya, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2. Keterkaitan ini memastikan bahwa perubahan pada satu blok akan mengubah hash blok tersebut sekaligus memutus keterhubungan dengan blok berikutnya, sehingga manipulasi mudah terdeteksi (Nakamoto, 2008; Merkle, 1988). Validasi dilakukan oleh node guru/admin sesuai skema PoA tanpa proses penambangan yang boros daya.



Gambar 2. Struktur blok dan keterkaitan rantai pada ledger Metaschool.

Pengujian Fungsional

Pengujian black-box terhadap delapan skenario utama menunjukkan seluruh fitur berfungsi sesuai harapan, termasuk operasi penuh ketika internet dimatikan. Ringkasan hasil disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian fungsional (black-box).

No	Skenario uji	Hasil yang diharapkan	Status
1	Registrasi & login secara luring	Akun terbuat, sesi aktif tanpa internet	Berhasil
2	Penyelesaian modul menambah XP	XP & progres terbaru	Berhasil
3	Pemberian lencana & kenaikan level	Lencana tampil, level naik	Berhasil
4	Pencatatan pencapaian ke ledger	Transaksi masuk ke blok baru	Berhasil
5	Tampilan papan peringkat	Peringkat terurut dengan benar	Berhasil
6	Verifikasi sertifikat via hash/QR	Status valid untuk data asli	Berhasil
7	Sinkronisasi ke node pusat	Blok terkirim & terverifikasi	Berhasil
8	Operasi saat internet dimatikan	Seluruh fitur inti berfungsi	Berhasil

Evaluasi Kinerja

Pengukuran kinerja pada prototipe menunjukkan sistem ringan dan responsif pada perangkat berdaya rendah. Latensi pencatatan satu transaksi rata-rata 41 ms dan pembentukan serta validasi blok melalui PoA mencapai 0,12 detik, lebih efisien dibanding skema Proof of Work karena tidak memerlukan proses penambangan. Hasil selengkapnya disajikan pada Tabel 3. Nilai-nilai ini merupakan hasil pengujian prototipe pada kondisi uji terbatas dan dapat bervariasi sesuai perangkat keras, kualitas jaringan lokal, jumlah pengguna aktif, serta beban kerja transaksi.

Tabel 3. Hasil evaluasi kinerja prototipe.

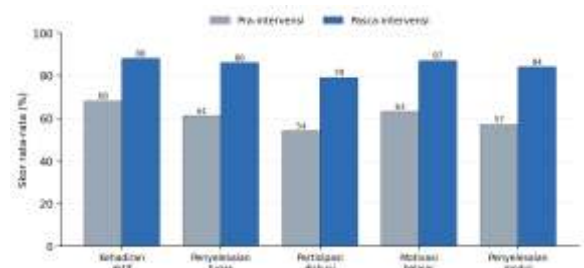
Metrik	Hasil rata-rata
Latensi pencatatan satu transaksi	41 ms
Waktu pembentukan & validasi blok (PoA)	0,12 detik
Throughput pencatatan	± 95 transaksi/detik
Replikasi antar-node lokal	0,08 detik
Waktu sinkronisasi 500 blok ke node pusat	6,3 detik
Penggunaan memori node	< 220 MB

Uji Integritas dan Keamanan

Pada uji integritas, dilakukan skenario perubahan nilai XP dan penggantian isi transaksi yang telah tercatat. Seluruh skenario manipulasi yang diuji terdeteksi karena perubahan data menyebabkan ketidakcocokan antara hash blok yang dihitung ulang dan hash yang tersimpan, sekaligus memutus keterkaitan dengan blok berikutnya. Dengan demikian, mekanisme hash berantai dan Merkle root menunjukkan kemampuan untuk mendeteksi perubahan tidak sah pada catatan pencapaian (Nakamoto, 2008; Merkle, 1988). Verifikasi keaslian sertifikat juga dapat dilakukan secara mandiri melalui pencocokan hash dan prinsip kredensial terverifikasi (W3C, 2022; Bapat, 2020).

Dampak terhadap Keterlibatan Siswa

Survei keterlibatan sebelum dan sesudah intervensi menunjukkan peningkatan pada seluruh dimensi yang diukur, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3 dan dirinci pada Tabel 4. Rata-rata skor keterlibatan naik dari 60,6% menjadi 84,8% dengan gain ternormalisasi rata-rata 0,62 yang tergolong kategori sedang menuju tinggi. Hasil ini sejalan dengan temuan terdahulu bahwa gamifikasi dapat meningkatkan motivasi dan keterlibatan belajar (Hamari et al., 2014; Koivisto dan Hamari, 2019; Ratinho dan Martins, 2023). Namun, karena uji coba dilakukan pada satu kelas tanpa kelompok kontrol, peningkatan tersebut perlu dipahami sebagai indikasi awal dan perlu divalidasi melalui studi berskala lebih besar.



Gambar 3. Perbandingan skor keterlibatan siswa sebelum dan sesudah intervensi.

Tabel 4. Skor keterlibatan dan gain ternormalisasi per dimensi.

Dimensi keterlibatan	Pra (%)	Pasca (%)	Gain (g)
Kehadiran aktif	68	88	0,63
Penyelesaian tugas	61	86	0,64
Partisipasi diskusi	54	79	0,54
Motivasi belajar	63	87	0,65
Penyelesaian modul	57	84	0,63
Rata-rata	60,6	84,8	0,62

Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Dibandingkan pendekatan terdahulu, Metaschool memberi keunggulan utama berupa kemampuan operasi penuh tanpa internet sambil tetap menjamin integritas dan keterverifikasian catatan. Gamifikasi yang berdiri sendiri unggul dalam keterlibatan tetapi lemah pada integritas data, sedangkan platform blockchain pendidikan daring kuat dalam integritas namun menuntut konektivitas dan sumber daya tinggi (Androulaki et al., 2018; Alammary et al., 2019). Ringkasan perbandingan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Metaschool dengan pendekatan terdahulu.

Aspek	Perbandingan
Operasi tanpa internet	Gamifikasi saja: Terbatas; Blockchain daring: Tidak; Metaschool: Ya
Integritas catatan	Gamifikasi saja: Lemah; Blockchain daring: Kuat; Metaschool: Kuat
Verifikasi kredensial	Gamifikasi saja: Manual; Blockchain daring: Otomatis (daring); Metaschool: Otomatis (luring + anchoring)
Keterlibatan siswa	Gamifikasi saja: Tinggi; Blockchain daring: Variatif; Metaschool: Tinggi
Kebutuhan sumber daya	Gamifikasi saja: Rendah-sedang; Blockchain daring: Tinggi; Metaschool: Rendah-sedang
Kesesuaian daerah 3T	Gamifikasi saja: Sebagian; Blockchain daring: Rendah; Metaschool: Tinggi

Implikasi

Secara teoretis, penelitian ini memperluas penerapan blockchain pendidikan ke ranah offline-first (Kleppmann et al., 2019) dan menunjukkan bahwa integrasi gamifikasi dengan buku besar tak-dapat-diubah berpotensi menjawab dua persoalan sekaligus, yaitu keterlibatan belajar dan kredibilitas catatan. Secara praktis, arsitektur hemat sumber daya ini dapat menjadi rujukan awal bagi sekolah kejuruan di daerah 3T untuk membangun ekosistem pembelajaran digital yang mandiri, serta menghasilkan sertifikat mikro yang dapat diverifikasi oleh dunia industri sebagai bukti kompetensi lulusan.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, uji coba dilakukan pada satu kelas dan satu sekolah sehingga hasilnya belum dapat digeneralisasi ke seluruh konteks sekolah 3T. Kedua, periode implementasi selama empat minggu belum cukup untuk menilai keberlanjutan motivasi belajar dalam jangka panjang. Ketiga, pengukuran keterlibatan masih bersifat deskriptif dan belum menggunakan kelompok kontrol. Keempat, skema PoA mengasumsikan validator sekolah bersifat tepercaya, sehingga pengembangan berikutnya perlu memperkuat manajemen kunci, audit validator, dan mekanisme sinkronisasi multi-sekolah.

5. Kesimpulan

1. Metaschool berhasil dirancang sebagai prototipe platform pembelajaran tergamifikasi berbasis blockchain offline untuk konteks SMK di daerah terpencil, dengan arsitektur tiga lapisan yang berjalan pada jaringan lokal sekolah.
2. Sistem dapat berfungsi penuh tanpa internet dengan kinerja ringan pada perangkat berdaya rendah, serta mampu mendeteksi skenario manipulasi data yang diuji berkat keterkaitan hash dan pohon Merkle pada ledger.
3. Penerapan gamifikasi menunjukkan peningkatan rata-rata keterlibatan siswa dari 60,6% menjadi 84,8% (gain ternormalisasi 0,62) pada uji coba terbatas, sehingga

menunjukkan potensi yang menjanjikan untuk diteliti lebih lanjut.

4. Pengembangan selanjutnya disarankan mencakup uji coba berskala lebih besar dan jangka panjang, penguatan keamanan kunci dan identitas, optimasi mekanisme sinkronisasi multi-sekolah, serta integrasi standar kredensial terverifikasi untuk interoperabilitas dengan industri.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Lampung, kepala sekolah, guru, dan siswa SMK Negeri 1 Merbau Mataram, Lampung Selatan, yang telah mendukung dan berpartisipasi dalam penelitian ini, serta kepada pihak-pihak yang telah memberikan masukan terhadap pengembangan sistem.

Daftar Pustaka

- Alammary, A., Alhazmi, S., Almasri, M. and Gillani, S. (2019) Blockchain-based applications in education: A systematic review, *Applied Sciences*, 9(12), art. 2400. doi: 10.3390/app9122400.
- Androulaki, E. et al. (2018) Hyperledger Fabric: A distributed operating system for permissioned blockchains, dalam *Proc. 13th EuroSys Conference*, art. 30. doi: 10.1145/3190508.3190538.
- Bapat, C. (2020) Blockchain for academic credentials, *arXiv:2006.12665*.
- Branch, R. M. (2009) *Instructional Design: The ADDIE Approach*. New York: Springer. doi: 10.1007/978-0-387-09506-6.
- Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R. and Nacke, L. (2011) From game design elements to gamefulness: Defining gamification, dalam *Proc. 15th International Academic MindTrek Conference*, hlm. 9–15. doi: 10.1145/2181037.2181040.
- Hamari, J., Koivisto, J. and Sarsa, H. (2014) Does gamification work? A literature review of empirical studies on gamification, dalam *Proc. 47th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, hlm. 3025–3034. doi: 10.1109/HICSS.2014.377.
- Kleppmann, M., Wiggins, A., van Hardenberg, P. and McGranaghan, M. (2019) Local-first software: You own your data, in spite of the cloud, dalam *Proc. ACM SIGPLAN International Symposium (Onward!)*, hlm. 154–178. doi: 10.1145/3359591.3359737.

- Koivisto, J. and Hamari, J. (2019) The rise of motivational information systems: A review of gamification research, *International Journal of Information Management*, 45, hlm. 191–210. doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2018.10.013.
- Mardiana, M., Despa, D., Muhammad, M. A., Septiana, T. and Lorenza, T. A. (2022) Sistem navigasi augmented reality dengan pencarian jalur terbaik menuju lokasi pustaka (studi kasus pada UPT Perpustakaan Unila), *Jurnal Profesi Insinyur Universitas Lampung (JPI)*. Tersedia: <http://jpi.eng.unila.ac.id/index.php/ojs/article/view/78>.
- Merkle, R. C. (1988) A digital signature based on a conventional encryption function, dalam *Advances in Cryptology—CRYPTO '87*, LNCS 293. Berlin: Springer, hlm. 369–378. doi: 10.1007/3-540-48184-2_32.
- Nakamoto, S. (2008) Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. Tersedia: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- National Institute of Standards and Technology. (2015) Secure Hash Standard (SHS), FIPS PUB 180-4. doi: 10.6028/NIST.FIPS.180-4.
- Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A. and Chatterjee, S. (2007) A design science research methodology for information systems research, *Journal of Management Information Systems*, 24(3), hlm. 45–77. doi: 10.2753/MIS0742-1222240302.
- Ratinho, E. and Martins, C. (2023) The role of gamified learning strategies in student's motivation in high school and higher education: A systematic review, *Heliyon*, 9(8), art. e19033. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e19033.
- Ryan, R. M. and Deci, E. L. (2000) Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being, *American Psychologist*, 55(1), hlm. 68–78. doi: 10.1037/0003-066X.55.1.68.
- UNESCO. (2023) Global Education Monitoring Report 2023: Technology in Education—A Tool on Whose Terms? Paris: UNESCO. doi: 10.54676/UZQV8501. Tersedia: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000385723>.
- W3C. (2022) Verifiable Credentials Data Model v1.1, W3C Recommendation. Tersedia: <https://www.w3.org/TR/vc-data-model/>.