

Model Konseptual Preservasi dan Rekonstruksi Gendhing Berbasis Kecerdasan Buatan Menggunakan Generative AI dan Digital Twin

Arry Maulana Syarif, Lukas Yulianto*, Fikri Budiman, Edi Sugiarto

Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Dian Nuswantoro, Indonesia

*Penulis Korespondensi: lukasyulianto@dsn.dinus.ac.id

Abstrak: Preservasi gendhing gamelan sebagai bagian dari warisan budaya takbenda menghadapi berbagai tantangan, termasuk degradasi arsip historis, keterbatasan dokumentasi notasi, variasi gaya regional, serta keterbatasan akses terhadap instrumen fisik dan sumber pembelajaran. Perkembangan teknologi kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) membuka peluang baru untuk mengatasi tantangan tersebut melalui analisis, restorasi, dan rekonstruksi digital berbasis data. Namun, sebagian besar penelitian yang ada masih berfokus pada implementasi teknologi secara terpisah dan belum menyediakan kerangka konseptual yang terintegrasi untuk preservasi dan rekonstruksi gendhing secara sistematis. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model konseptual preservasi dan rekonstruksi gendhing berbasis kecerdasan buatan yang mengintegrasikan proses digitalisasi arsip, analisis berbasis machine learning, rekonstruksi menggunakan generative AI, serta virtualisasi instrumen melalui teknologi digital twin. Model konseptual yang diusulkan terdiri dari lima lapisan utama, yaitu digitalisasi arsip, analisis berbasis kecerdasan buatan, rekonstruksi generatif, virtualisasi instrumen, dan validasi budaya. Model ini menjelaskan alur transformasi data dari arsip historis menjadi representasi digital interaktif yang dapat diakses, dianalisis, dan direkonstruksi secara sistematis. Kontribusi utama penelitian ini adalah penyediaan kerangka konseptual yang mengintegrasikan berbagai teknologi kecerdasan buatan dalam suatu ekosistem preservasi digital yang mendukung keberlanjutan, aksesibilitas, dan rekonstruksi warisan budaya musikal secara autentik dan sistematis. Model ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan sistem preservasi digital berbasis kecerdasan buatan untuk gamelan dan warisan budaya musikal lainnya.

Keywords: Generative AI, digital twin, preservasi musik, rekonstruksi musik, gamelan

1. PENDAHULUAN

Gendhing merupakan inti dari tradisi musik gamelan Jawa yang tidak hanya berfungsi sebagai komposisi musikal, tetapi juga sebagai media transmisi nilai budaya, filosofi, dan identitas kolektif komunitas (Becker, 1980). Dalam konteks etnomusikologi, gendhing merepresentasikan struktur musikal yang kompleks, mencakup balungan sebagai kerangka melodi, cengkok sebagai

Cara Mengutip:

Syarif, A. M., Yulianto, L., Budiman, F., & Sugiarto, E. (2026). Model Konseptual Preservasi dan Rekonstruksi Gendhing Berbasis Kecerdasan Buatan Menggunakan Generative AI dan Digital Twin. IRCS: Integrative Research in Computer Science, 1(2), 1-21.

ornamentasi, serta interaksi dinamis antar instrumen dalam suatu ansambel. Keberadaan gendhing sebagai warisan budaya takbenda telah diakui secara global, termasuk dalam pengakuan gamelan oleh UNESCO sebagai bagian dari intangible cultural heritage, yang menegaskan pentingnya upaya preservasi dan keberlanjutan tradisi ini lintas generasi (UNESCO, 2014). Namun demikian, preservasi gendhing menghadapi tantangan yang signifikan dalam era modern. Salah satu tantangan utama adalah degradasi arsip historis, di mana banyak rekaman gamelan lama mengalami penurunan kualitas akibat keterbatasan teknologi perekaman analog, kerusakan media penyimpanan, serta distorsi akustik yang mengganggu integritas data musikal (Prasetyo, 2021). Selain itu, sebagian besar repertoar gendhing ditransmisikan melalui tradisi lisan, sehingga dokumentasi formal dalam bentuk notasi sering kali tidak lengkap atau bahkan tidak tersedia (Supanggah, 2007; Sumarsam, 2013). Kondisi ini menyebabkan banyak komposisi tradisional hanya tersisa dalam bentuk fragmen, atau hilang sepenuhnya akibat tidak adanya dokumentasi yang memadai.

Kompleksitas preservasi gendhing juga diperparah oleh adanya variasi gaya regional yang signifikan, seperti gaya Surakarta, Yogyakarta, dan Banyumas, yang masing-masing memiliki karakteristik musikal yang berbeda dalam hal struktur ritmis, ornamentasi, dan interpretasi estetika (Perlman, 2004; Lindsay, 1992). Variasi ini mencerminkan kekayaan budaya gamelan, namun sekaligus menimbulkan tantangan dalam proses dokumentasi dan rekonstruksi, karena tidak terdapat satu representasi tunggal yang dapat dianggap sebagai standar universal. Di sisi lain, keterbatasan akses terhadap instrumen gamelan fisik serta distribusi arsip yang tersebar dan tidak terintegrasi semakin membatasi upaya pelestarian dan pembelajaran gamelan secara global (Sumarsam, 2020).

Perkembangan teknologi digital dan kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) membuka peluang baru dalam preservasi dan rekonstruksi warisan budaya musikal, termasuk gendhing gamelan. Teknologi seperti machine learning, neural audio restoration, dan generative AI memungkinkan analisis pola musikal secara otomatis, pemulihan kualitas rekaman yang terdegradasi, serta rekonstruksi komposisi yang tidak lengkap berdasarkan pola struktural yang dipelajari dari dataset historis (Défossez et al., 2019; Briot et al., 2020). Selain itu, pendekatan berbasis digital twin dan physics-based audio synthesis memungkinkan penciptaan model virtual instrumen gamelan yang dapat mereplikasi karakteristik visual dan akustik instrumen asli secara realistis (Engel et al., 2019). Integrasi teknologi ini tidak hanya mendukung preservasi pasif dalam bentuk arsip digital, tetapi juga memungkinkan pembentukan ekosistem interaktif yang mendukung pembelajaran, penelitian, dan eksplorasi kreatif berbasis gamelan. Meskipun berbagai teknologi AI telah diterapkan secara terpisah dalam domain restorasi audio, analisis musik, dan generasi komposisi, sebagian besar penelitian masih berfokus pada aspek teknis yang terisolasi dan belum

mengintegrasikan berbagai komponen tersebut dalam suatu kerangka konseptual yang komprehensif untuk preservasi dan rekonstruksi gendhing secara sistematis. Ketiadaan model konseptual yang terintegrasi menyebabkan kurangnya pemahaman tentang bagaimana berbagai teknologi AI dapat berinteraksi secara sinergis dalam membentuk suatu ekosistem preservasi digital yang berkelanjutan dan autentik secara budaya.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan suatu model konseptual preservasi dan rekonstruksi gendhing berbasis kecerdasan buatan yang mengintegrasikan proses digitalisasi arsip, analisis musikal berbasis machine learning, rekonstruksi komposisi menggunakan generative AI, serta virtualisasi instrumen melalui pendekatan digital twin. Model konseptual ini diharapkan dapat memberikan kerangka sistematis untuk memahami peran AI dalam preservasi warisan budaya musikal, sekaligus menjadi dasar bagi pengembangan sistem preservasi digital gamelan yang mendukung keberlanjutan budaya, aksesibilitas global, dan inovasi kreatif berbasis teknologi. Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan kerangka konseptual yang menjelaskan hubungan antara digitalisasi arsip, analisis berbasis AI, rekonstruksi generatif, dan virtualisasi instrumen dalam suatu ekosistem preservasi digital gendhing. Dengan pendekatan ini, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi pada bidang ilmu komputer, khususnya dalam domain kecerdasan buatan dan pemrosesan sinyal audio, tetapi juga pada bidang preservasi budaya digital dan etnomusikologi komputasional, dengan menyediakan perspektif integratif yang menghubungkan teknologi dan warisan budaya dalam suatu model sistem yang koheren.

2. TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN KONSEPTUAL

2.1 Preservasi Digital Warisan Budaya

Preservasi digital merupakan pendekatan sistematis untuk melindungi, menyimpan, dan memastikan keberlanjutan akses terhadap aset budaya dalam bentuk digital. Dalam konteks warisan budaya takbenda seperti musik tradisional, preservasi digital tidak hanya mencakup penyimpanan rekaman audio, tetapi juga dokumentasi struktur musikal, konteks performatif, dan karakteristik interpretatif yang melekat pada praktik budaya tersebut (Oomen & Aroyo, 2011). Preservasi digital menjadi semakin penting karena media penyimpanan analog, seperti pita magnetik dan piringan hitam, rentan terhadap degradasi fisik dan kehilangan data seiring waktu (Kartomi, 2011).

Dalam tradisi gamelan Jawa, gendhing sebagai bentuk komposisi utama menghadapi risiko kehilangan akibat keterbatasan dokumentasi tertulis dan ketergantungan pada transmisi lisan (Supanggah, 2007; Sumarsam, 2013). Rekaman historis yang tersedia sering kali memiliki kualitas yang rendah, dengan tingkat noise tinggi, distorsi frekuensi, dan ketidakstabilan pitch yang

mengurangi akurasi representasi musikal (Prasetyo, 2021). Selain itu, dokumentasi metadata seperti informasi tentang gaya regional, maestro, dan konteks performa sering kali tidak lengkap, sehingga menyulitkan proses analisis dan rekonstruksi.

Pendekatan preservasi digital modern berupaya mengatasi keterbatasan ini melalui digitalisasi arsip analog ke format digital berkualitas tinggi, pelabelan metadata secara sistematis, serta integrasi dengan sistem penyimpanan berbasis cloud atau distributed storage untuk memastikan keberlanjutan akses jangka panjang (Grant, 2017). Namun, preservasi digital konvensional umumnya bersifat pasif, hanya berfungsi sebagai media penyimpanan tanpa kemampuan untuk merekonstruksi atau memperbaiki data yang hilang. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih aktif dan adaptif, yang mampu tidak hanya menyimpan tetapi juga memulihkan dan merekonstruksi warisan budaya musikal secara dinamis.

2.2 Kecerdasan Buatan dalam Analisis dan Preservasi Musik

Perkembangan kecerdasan buatan telah membuka peluang baru dalam analisis dan preservasi musik melalui kemampuan untuk memproses dan memahami pola musikal secara otomatis. Machine learning memungkinkan ekstraksi fitur audio seperti Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC), spectral centroid, dan pola ritmis, yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik musikal tertentu, termasuk gaya regional dan struktur komposisi (Herremans & Chew, 2017). Dalam konteks preservasi musik tradisional, AI telah digunakan untuk mengklasifikasikan gaya musikal, mengidentifikasi instrumen, dan menganalisis struktur komposisi berdasarkan dataset rekaman historis. Pendekatan berbasis Convolutional Neural Networks (CNN) memungkinkan analisis spectrogram sebagai representasi visual dari sinyal audio, sehingga model dapat mengenali pola spektral dan temporal yang kompleks secara otomatis (Choi et al., 2020). Pendekatan ini sangat relevan untuk musik gamelan, yang memiliki struktur polifonik kompleks dan karakteristik timbre yang unik.

Selain analisis, AI juga memainkan peran penting dalam restorasi audio. Teknik neural audio restoration, seperti denoising autoencoders dan deep neural networks, memungkinkan pengurangan noise dan pemulihan kualitas audio tanpa menghilangkan karakteristik akustik asli instrumen (Vincent et al., 2010; Défossez et al., 2019). Teknologi source separation, seperti Spleeter dan Open-Unmix, memungkinkan pemisahan instrumen individu dari rekaman campuran, sehingga memudahkan analisis struktural dan rekonstruksi aransemen musikal (Stöter et al., 2019). Dengan kemampuan ini, AI tidak hanya berfungsi sebagai alat analisis, tetapi juga sebagai sarana untuk meningkatkan kualitas dan utilitas arsip musik digital.

2.3 Generative AI untuk Rekonstruksi Musik

Generative AI merupakan cabang kecerdasan buatan yang berfokus pada kemampuan untuk menghasilkan data baru yang memiliki karakteristik serupa dengan data pelatihan. Dalam domain musik, generative AI memungkinkan rekonstruksi komposisi yang tidak lengkap dengan memanfaatkan pola struktural yang dipelajari dari dataset musik yang ada (Briot et al., 2020). Model berbasis sequence modeling, seperti Hidden Markov Models (HMM), Variational Autoencoders (VAE), dan Transformer architectures, telah digunakan secara luas untuk memodelkan struktur musik simbolik dan menghasilkan komposisi baru yang koheren secara musikal (Huang et al., 2019). Transformer, khususnya, memiliki kemampuan untuk menangkap dependensi jangka panjang dalam data sekuensial, sehingga sangat efektif dalam memodelkan struktur formal musik yang kompleks, termasuk hubungan antara balungan dan ornamentasi dalam gendhing gamelan.

Selain rekonstruksi berbasis notasi simbolik, generative AI juga dapat digunakan untuk menghasilkan representasi audio melalui pendekatan neural audio synthesis. Model seperti Generative Adversarial Networks (GAN) dan Differentiable Digital Signal Processing (DDSP) memungkinkan sintesis suara instrumen yang realistis berdasarkan karakteristik akustik yang dipelajari dari rekaman historis (Engel et al., 2019). Dengan mengintegrasikan analisis simbolik dan sintesis audio, generative AI memungkinkan rekonstruksi gendhing yang tidak hanya akurat secara struktural, tetapi juga autentik secara akustik. Kemampuan generative AI untuk memprediksi bagian yang hilang dan menghasilkan variasi musikal yang konsisten dengan gaya tertentu menjadikannya alat yang sangat potensial dalam preservasi warisan budaya musikal. Namun, pemanfaatan teknologi ini memerlukan kerangka konseptual yang jelas untuk memastikan bahwa proses rekonstruksi tetap mempertahankan integritas budaya dan estetika tradisional.

2.4 Digital Twin dan Virtualisasi Instrumen Musik

Digital twin merupakan representasi virtual dari objek fisik yang mereplikasi karakteristik struktural dan fungsional objek tersebut secara digital. Dalam konteks instrumen musik, digital twin memungkinkan penciptaan model virtual instrumen yang tidak hanya merepresentasikan bentuk visual, tetapi juga karakteristik akustik dan respons interaktif instrumen (Engel et al., 2019). Teknologi seperti photogrammetry dan laser scanning memungkinkan pembuatan model tiga dimensi instrumen dengan tingkat presisi tinggi, sementara physics-based modeling memungkinkan simulasi karakteristik akustik berdasarkan sifat material dan struktur fisik instrumen (Fontana et al., 2022). Pendekatan ini memungkinkan penciptaan instrumen virtual yang dapat dimainkan secara interaktif, baik untuk tujuan pendidikan, penelitian, maupun performa virtual.

Integrasi digital twin dengan teknologi Augmented Reality (AR) dan Virtual Reality (VR) membuka peluang untuk menciptakan lingkungan pembelajaran dan eksplorasi musikal yang imersif. Pelajar dapat berinteraksi dengan instrumen virtual dan mempelajari teknik permainan tanpa memerlukan akses ke instrumen fisik, sementara peneliti dapat menganalisis karakteristik akustik instrumen secara detail tanpa risiko merusak artefak asli (Begault, 2020). Dengan demikian, digital twin tidak hanya berfungsi sebagai alat preservasi, tetapi juga sebagai platform interaktif yang mendukung keberlanjutan dan penyebaran warisan budaya musikal.

2.5 Kebutuhan Model Konseptual untuk Preservasi dan Rekonstruksi Gendhing Berbasis AI

Meskipun berbagai teknologi kecerdasan buatan telah diterapkan dalam analisis, restorasi, dan generasi musik, sebagian besar penelitian masih berfokus pada pengembangan komponen teknis secara terpisah. Pendekatan ini belum memberikan gambaran menyeluruh tentang bagaimana berbagai teknologi tersebut dapat diintegrasikan dalam suatu sistem preservasi digital yang koheren dan sistematis. Dalam konteks preservasi gendhing, diperlukan suatu model konseptual yang menjelaskan hubungan antara proses digitalisasi arsip, analisis berbasis AI, rekonstruksi generatif, dan virtualisasi instrumen dalam suatu kerangka terpadu. Model konseptual ini penting untuk memberikan pemahaman teoritis tentang peran dan interaksi berbagai komponen teknologi dalam mendukung preservasi dan rekonstruksi warisan budaya musikal.

Dengan adanya model konseptual yang terstruktur, pengembangan sistem preservasi digital berbasis AI dapat dilakukan secara lebih sistematis, memastikan bahwa setiap komponen berkontribusi secara efektif dalam mencapai tujuan preservasi, rekonstruksi, dan aksesibilitas warisan budaya musikal. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan suatu model konseptual yang mengintegrasikan berbagai teknologi kecerdasan buatan dalam suatu kerangka terpadu untuk preservasi dan rekonstruksi gendhing gamelan.

3. MODEL KONSEPTUAL PRESERVASI DAN REKONSTRUKSI GENDHING BERBASIS KECERDASAN BUATAN

3.1 Pendekatan Pengembangan Model Konseptual

Pengembangan model konseptual dalam penelitian ini bertujuan untuk membangun kerangka sistematis yang menjelaskan bagaimana teknologi kecerdasan buatan dapat digunakan secara terintegrasi dalam proses preservasi dan rekonstruksi gendhing gamelan. Model konseptual ini dikembangkan berdasarkan sintesis literatur tentang preservasi digital, machine learning untuk analisis musik, generative AI untuk rekonstruksi komposisi, serta digital twin untuk virtualisasi instrumen (Briot et al., 2020; Engel et al., 2019; Herremans & Chew, 2017). Berbeda dengan

pendekatan teknis yang berfokus pada implementasi algoritma tertentu, model konseptual berfungsi untuk mengidentifikasi komponen utama sistem, hubungan antar komponen, serta alur transformasi data dari arsip historis menjadi representasi digital yang dapat diakses, dianalisis, dan direkonstruksi secara sistematis. Dalam konteks preservasi gendhing, pendekatan ini penting karena proses preservasi tidak hanya melibatkan digitalisasi data, tetapi juga analisis struktural, rekonstruksi komposisi, dan validasi budaya untuk memastikan keotentikan hasil preservasi (Sumarsam, 2020). Model konseptual yang diusulkan memandang preservasi gendhing sebagai suatu proses transformasi bertingkat (multi-layer transformation), di mana data arsip mengalami serangkaian proses digitalisasi, analisis berbasis AI, rekonstruksi generatif, dan virtualisasi, yang secara kolektif membentuk suatu ekosistem preservasi digital yang terintegrasi.

Model konseptual preservasi dan rekonstruksi gendhing berbasis AI terdiri dari lima komponen utama, yaitu: (1) lapisan digitalisasi arsip, (2) lapisan analisis berbasis kecerdasan buatan, (3) lapisan rekonstruksi generatif, (4) lapisan virtualisasi dan digital twin, dan (5) lapisan validasi budaya. Setiap komponen memiliki peran spesifik dalam proses preservasi dan rekonstruksi.

3.1.1 Lapisan Digitalisasi Arsip (Archival Digitalization Layer)

Lapisan digitalisasi arsip merupakan tahap awal dalam model konseptual, yang bertujuan untuk mengkonversi aset budaya dalam bentuk analog atau non-terstruktur menjadi format digital yang dapat diproses oleh sistem komputasi. Aset ini dapat berupa rekaman audio analog, notasi kepatihan, dokumentasi visual, serta metadata terkait konteks performa. Proses digitalisasi mencakup konversi rekaman analog ke format digital lossless, ekstraksi metadata seperti informasi gaya regional, maestro, dan periode historis, serta representasi simbolik musik dalam format digital seperti MIDI atau MusicXML (Grant, 2017). Digitalisasi yang akurat sangat penting karena kualitas data digital secara langsung mempengaruhi efektivitas proses analisis dan rekonstruksi berbasis AI. Rekaman dengan kualitas rendah atau metadata yang tidak lengkap dapat mengurangi kemampuan model untuk mempelajari pola musikal secara akurat. Lapisan ini berfungsi sebagai fondasi bagi seluruh proses preservasi digital, karena semua proses analisis dan rekonstruksi selanjutnya bergantung pada ketersediaan data digital yang representatif.

3.1.2 Lapisan Analisis Berbasis Kecerdasan Buatan (AI-Based Analysis Layer)

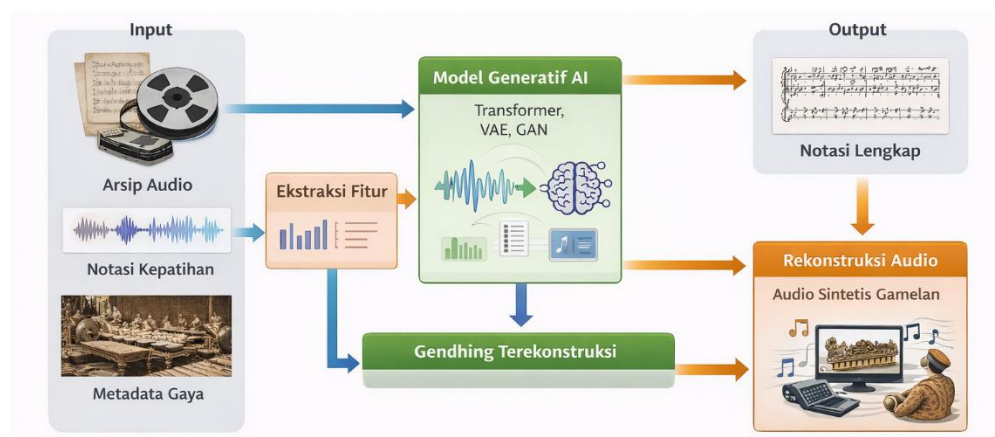
Setelah arsip didigitalisasi, tahap berikutnya adalah analisis berbasis kecerdasan buatan untuk mengekstraksi informasi musikal dari data digital. Lapisan ini memanfaatkan teknik machine learning dan pemrosesan sinyal audio untuk mengidentifikasi karakteristik struktural dan akustik gendhing. Proses utama dalam lapisan ini meliputi ekstraksi fitur audio seperti Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC), spectral centroid, dan pola ritmis, yang digunakan untuk merepresentasikan karakteristik timbre dan struktur musikal (Herremans & Chew, 2017). Selain

itu, teknik neural audio restoration digunakan untuk mengurangi noise dan meningkatkan kualitas rekaman historis, sehingga data yang dihasilkan lebih representatif terhadap performa asli (Défossez et al., 2019).

Analisis berbasis AI juga memungkinkan klasifikasi gaya regional melalui teknik clustering dan supervised learning, yang dapat mengidentifikasi pola musikal khas dari gaya Surakarta, Yogyakarta, atau Banyumas. Informasi ini penting untuk memastikan bahwa proses rekonstruksi mempertahankan karakteristik gaya yang sesuai dengan konteks budaya asli. Lapisan analisis berbasis AI berfungsi sebagai tahap interpretasi data, di mana data digital diubah menjadi representasi struktural yang dapat digunakan dalam proses rekonstruksi generatif.

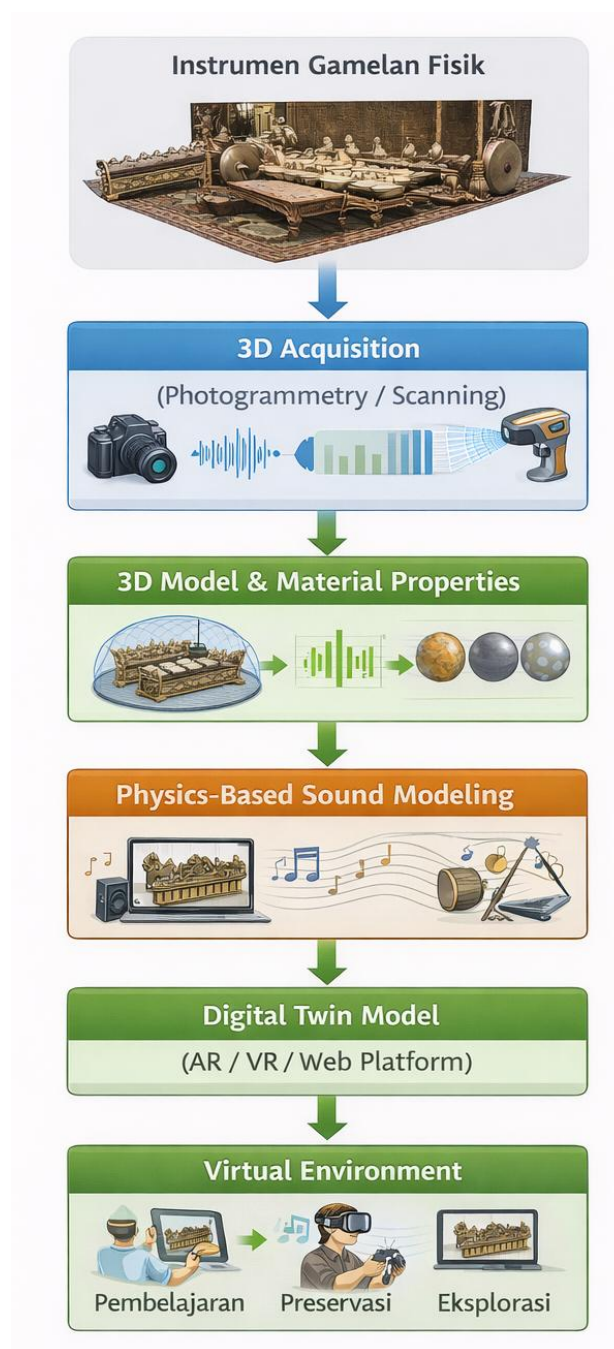
3.1.3 Lapisan Rekonstruksi Generatif (Generative Reconstruction Layer)

Lapisan rekonstruksi generatif merupakan komponen inti dalam model konseptual, yang bertanggung jawab untuk merekonstruksi bagian gendhing yang hilang atau tidak lengkap berdasarkan pola yang dipelajari dari dataset yang tersedia. Lapisan ini memanfaatkan teknologi generative AI, seperti transformer-based sequence modeling, variational autoencoders, dan generative adversarial networks, untuk menghasilkan representasi musikal baru yang konsisten dengan struktur dan gaya tradisional (Briot et al., 2020; Huang et al., 2019). Rekonstruksi dapat dilakukan pada dua tingkat representasi, yaitu tingkat simbolik dan tingkat audio. Pada tingkat simbolik, model AI dapat memprediksi urutan notasi yang hilang berdasarkan pola struktural gendhing yang ada. Pada tingkat audio, teknologi neural audio synthesis memungkinkan sintesis suara instrumen gamelan dengan karakteristik akustik yang realistis (Engel et al., 2019). Lapisan ini memungkinkan preservasi yang bersifat aktif, di mana sistem tidak hanya menyimpan data historis, tetapi juga mampu merekonstruksi dan memperluas representasi gendhing yang tidak lengkap.



Gambar 1. Arsitektur Rekonstruksi Generatif Gendhing Berbasis Kecerdasan Buatan

Untuk memperjelas mekanisme rekonstruksi generatif dalam model konseptual yang diusulkan, diperlukan representasi visual yang menunjukkan bagaimana model kecerdasan buatan memproses data input dan menghasilkan rekonstruksi musikal. Proses ini melibatkan ekstraksi fitur dari data arsip, pembelajaran pola menggunakan model generative AI, serta produksi output dalam bentuk notasi simbolik dan representasi audio. Arsitektur rekonstruksi generatif yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 2. Arsitektur Digital Twin Instrumen Gamelan untuk Preservasi dan Interaksi Virtual

3.1.4 Lapisan Virtualisasi dan Digital Twin (Virtualization and Digital Twin Layer)

Lapisan virtualisasi bertujuan untuk menciptakan representasi digital interaktif dari instrumen gamelan dan komposisi gendhing yang telah direkonstruksi. Teknologi digital twin memungkinkan penciptaan model virtual instrumen yang mereplikasi karakteristik visual dan akustik instrumen asli melalui teknik photogrammetry dan physics-based modeling (Fontana et al., 2022). Model digital ini dapat diintegrasikan dengan sistem interaktif seperti Augmented Reality (AR) dan Virtual Reality (VR), memungkinkan pengguna untuk berinteraksi dengan instrumen virtual dan mempelajari struktur musikal gendhing secara imersif (Begault, 2020). Virtualisasi ini memperluas fungsi preservasi digital dari sekadar penyimpanan arsip menjadi platform interaktif yang mendukung pembelajaran dan eksplorasi musikal. Lapisan virtualisasi juga meningkatkan aksesibilitas warisan budaya gamelan, memungkinkan pengguna dari berbagai lokasi geografis untuk mengakses dan mempelajari gendhing tanpa memerlukan instrumen fisik.

Untuk memahami struktur dan komponen dalam lapisan virtualisasi, diperlukan representasi visual yang menunjukkan bagaimana instrumen gamelan fisik ditransformasikan menjadi representasi digital interaktif melalui teknologi digital twin. Proses ini mencakup akuisisi bentuk fisik menggunakan teknik photogrammetry, pemodelan karakteristik akustik menggunakan physics-based modeling, serta integrasi dalam lingkungan virtual yang memungkinkan interaksi pengguna secara langsung. Arsitektur digital twin instrumen gamelan yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 2.

3.1.5 Lapisan Validasi Budaya (Cultural Validation Layer)

Lapisan validasi budaya merupakan komponen penting yang memastikan bahwa hasil rekonstruksi berbasis AI tetap sesuai dengan nilai estetika dan tradisi budaya gamelan. Meskipun AI dapat merekonstruksi pola musikal secara statistik, validasi oleh maestro gamelan dan pakar etnomusikologi diperlukan untuk memastikan keotentikan dan legitimasi budaya hasil rekonstruksi (Sumarsam, 2020). Validasi budaya berfungsi sebagai mekanisme kontrol kualitas yang mengintegrasikan pengetahuan tradisional dengan teknologi modern. Proses ini dapat mencakup evaluasi struktur musikal, kesesuaian gaya regional, serta interpretasi estetika hasil rekonstruksi. Dengan adanya lapisan validasi budaya, model konseptual ini mengadopsi pendekatan human-in-the-loop, di mana kecerdasan buatan berfungsi sebagai alat bantu yang mendukung, bukan menggantikan, peran manusia dalam preservasi warisan budaya.

3.2 Hubungan Antar Komponen dalam Model Konseptual

Kelima komponen dalam model konseptual ini membentuk suatu alur transformasi yang terintegrasi, di mana setiap lapisan berkontribusi pada proses preservasi dan rekonstruksi secara

keseluruhan. Proses dimulai dari digitalisasi arsip, yang menghasilkan data digital sebagai input bagi lapisan analisis berbasis AI. Hasil analisis kemudian digunakan oleh lapisan rekonstruksi generatif untuk menghasilkan representasi gendhing yang lengkap. Representasi ini selanjutnya digunakan dalam lapisan virtualisasi untuk menciptakan model interaktif, sementara lapisan validasi budaya memastikan keotentikan hasil rekonstruksi.

Hubungan antar komponen ini bersifat hierarkis dan iteratif. Hasil validasi budaya dapat digunakan untuk memperbaiki model AI melalui proses pembelajaran ulang (model refinement), sehingga meningkatkan akurasi rekonstruksi di masa depan. Dengan demikian, model konseptual ini tidak hanya bersifat statis, tetapi juga adaptif dan berkembang seiring waktu.

3.3 Arsitektur Model Konseptual

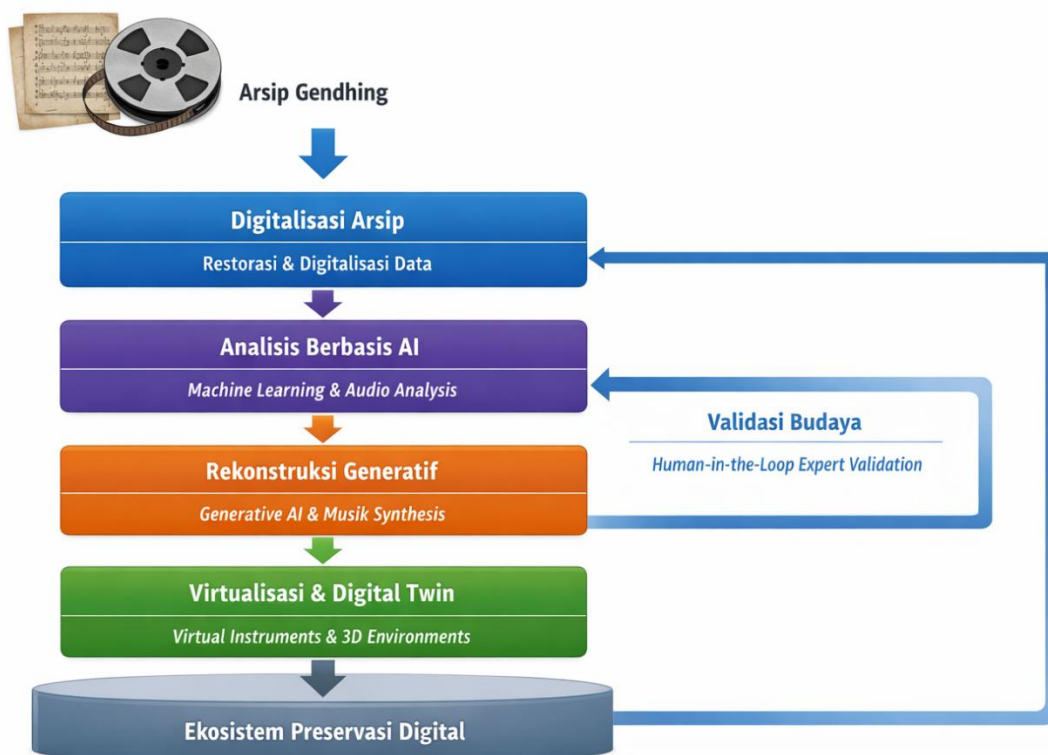
Berdasarkan komponen-komponen yang telah diidentifikasi pada bagian sebelumnya, model konseptual yang diusulkan dalam penelitian ini merepresentasikan preservasi dan rekonstruksi gendhing sebagai suatu sistem transformasi digital yang terintegrasi. Model ini menjelaskan bagaimana aset budaya dalam bentuk arsip historis ditransformasikan melalui serangkaian proses berbasis kecerdasan buatan menjadi representasi digital yang dapat direkonstruksi, divisualisasikan, dan diakses secara interaktif. Model konseptual ini terdiri dari lima lapisan utama yang saling terhubung secara hierarkis dan fungsional, yaitu: (1) digitalisasi arsip, (2) analisis berbasis kecerdasan buatan, (3) rekonstruksi generatif, (4) virtualisasi dan digital twin, serta (5) validasi budaya. Setiap lapisan merepresentasikan tahap transformasi tertentu dalam proses preservasi digital, di mana output dari satu lapisan menjadi input bagi lapisan berikutnya.

Untuk memberikan pemahaman yang lebih sistematis mengenai integrasi kecerdasan buatan dalam preservasi dan rekonstruksi gendhing, penelitian ini mengusulkan suatu model konseptual yang merepresentasikan preservasi digital sebagai proses transformasi bertingkat. Model ini menggambarkan bagaimana arsip gendhing, yang awalnya berada dalam bentuk analog atau digital tidak terstruktur, ditransformasikan melalui serangkaian lapisan pemrosesan berbasis kecerdasan buatan hingga menjadi representasi digital interaktif yang dapat diakses, direkonstruksi, dan divirtualisasikan.

Proses tersebut dimulai dari tahap digitalisasi arsip, yang berfungsi untuk mengkonversi rekaman historis dan dokumentasi musikal menjadi format digital yang dapat diproses secara komputasional. Selanjutnya, lapisan analisis berbasis kecerdasan buatan mengekstraksi karakteristik struktural dan akustik dari data digital menggunakan teknik machine learning dan pemrosesan sinyal audio (Herremans & Chew, 2017; Défossez et al., 2019). Informasi yang dihasilkan dari tahap analisis kemudian digunakan dalam lapisan rekonstruksi generatif, di mana model generative AI

merekonstruksi bagian gendhing yang hilang atau tidak lengkap berdasarkan pola musikal yang dipelajari dari dataset historis (Briot et al., 2020; Huang et al., 2019).

Hasil rekonstruksi selanjutnya diintegrasikan dalam lapisan virtualisasi dan digital twin, yang memungkinkan penciptaan representasi virtual instrumen dan komposisi gamelan secara interaktif menggunakan teknologi pemodelan berbasis fisika dan lingkungan virtual (Engel et al., 2019; Fontana et al., 2022). Selain itu, model ini juga mencakup lapisan validasi budaya yang berfungsi sebagai mekanisme kontrol berbasis human-in-the-loop, di mana pakar gamelan dan komunitas budaya berperan dalam memastikan keotentikan dan kesesuaian hasil rekonstruksi dengan tradisi musikal yang berlaku (Sumarsam, 2020). Secara keseluruhan, model konseptual ini menggambarkan hubungan antar lapisan dalam suatu ekosistem preservasi digital yang terintegrasi, di mana kecerdasan buatan berperan sebagai mekanisme utama dalam analisis, rekonstruksi, dan virtualisasi warisan budaya musikal. Struktur dan alur transformasi dalam model konseptual yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 3.



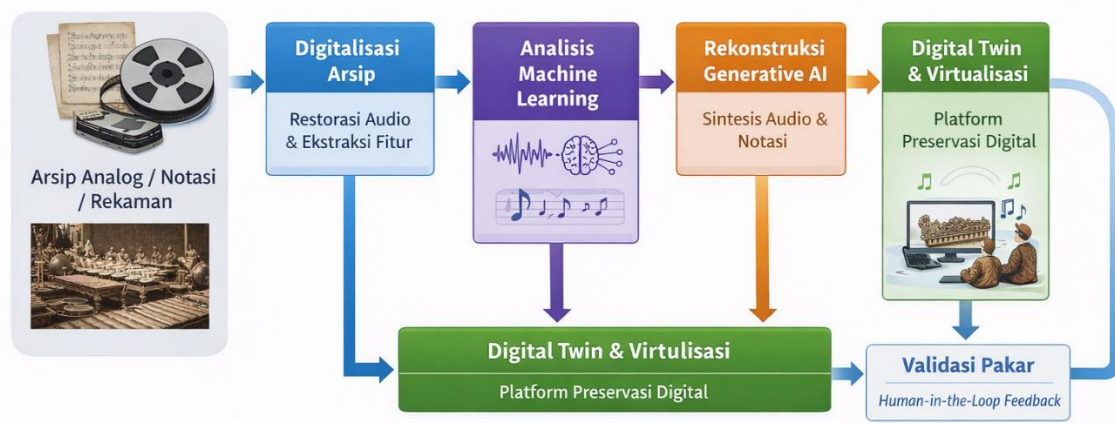
Gambar 3. Model konseptual preservasi dan rekonstruksi gendhing berbasis AI

Secara konseptual, model ini memandang preservasi digital bukan sebagai proses statis, tetapi sebagai suatu sistem dinamis yang mampu meningkatkan kualitas representasi digital warisan budaya melalui analisis dan rekonstruksi berbasis kecerdasan buatan. Dengan pendekatan ini,

preservasi tidak hanya berfungsi untuk menyimpan data historis, tetapi juga untuk memulihkan, merekonstruksi, dan memperluas akses terhadap warisan budaya musikal secara berkelanjutan.

3.4 Alur Transformasi dalam Model Konseptual

Model konseptual yang diusulkan menggambarkan alur transformasi data dalam lima tahap utama, yang secara kolektif membentuk suatu ekosistem preservasi digital berbasis kecerdasan buatan. Untuk memperjelas mekanisme transformasi data dalam model konseptual yang diusulkan, diperlukan representasi visual yang menunjukkan urutan proses yang terjadi dari arsip historis hingga terbentuknya representasi digital interaktif. Alur ini mencerminkan pipeline pemrosesan berbasis kecerdasan buatan, di mana data arsip mengalami serangkaian tahap digitalisasi, analisis, rekonstruksi, dan virtualisasi secara bertahap. Setiap tahap berkontribusi dalam meningkatkan kualitas, kelengkapan, dan aksesibilitas representasi digital gendhing. Selain itu, model ini juga mencakup mekanisme validasi berbasis pakar yang berfungsi sebagai umpan balik untuk meningkatkan akurasi sistem secara berkelanjutan. Alur transformasi dalam model konseptual ini ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Alur Transformasi Preservasi dan Rekonstruksi Gendhing Berbasis Kecerdasan Buatan

Tahap pertama adalah digitalisasi arsip, di mana aset budaya dalam bentuk rekaman analog, notasi, dan dokumentasi visual dikonversi menjadi format digital yang dapat diproses oleh sistem komputasi. Proses ini mencakup konversi audio analog ke format digital berkualitas tinggi, ekstraksi metadata, serta representasi simbolik musik dalam format digital seperti MIDI atau MusicXML (Grant, 2017). Transformasi ini memungkinkan data historis yang sebelumnya tidak terstruktur menjadi data terstruktur yang dapat dianalisis secara komputasional. Kualitas digitalisasi memainkan peran penting dalam menentukan efektivitas proses analisis selanjutnya, karena data yang terdegradasi atau tidak lengkap dapat mengurangi akurasi model kecerdasan buatan.

Setelah digitalisasi, tahap berikutnya adalah analisis berbasis kecerdasan buatan, di mana data audio dan simbolik dianalisis untuk mengekstraksi karakteristik musikal yang relevan. Teknik machine learning digunakan untuk mengekstraksi fitur audio, mengidentifikasi pola ritmis, serta mengklasifikasikan gaya musikal berdasarkan karakteristik spektral dan temporal (Herremans & Chew, 2017). Selain itu, teknik neural audio restoration digunakan untuk meningkatkan kualitas rekaman historis dengan mengurangi noise dan memperbaiki distorsi, sehingga menghasilkan representasi audio yang lebih akurat (Défossez et al., 2019). Proses ini memungkinkan sistem untuk memahami struktur musikal gendhing secara lebih komprehensif, termasuk hubungan antara instrumen, pola ritmis, dan karakteristik gaya regional.

Tahap berikutnya adalah rekonstruksi generatif, di mana model generative AI digunakan untuk merekonstruksi bagian gendhing yang hilang atau tidak lengkap. Model berbasis transformer dan variational autoencoder dapat mempelajari pola struktural dari dataset musik dan menghasilkan representasi baru yang konsisten dengan gaya dan struktur tradisional (Briot et al., 2020; Huang et al., 2019). Proses rekonstruksi ini memungkinkan sistem untuk mengisi bagian yang hilang dalam komposisi, memperbaiki struktur musikal yang tidak lengkap, serta menghasilkan representasi audio yang realistis melalui teknologi neural audio synthesis (Engel et al., 2019). Dengan demikian, preservasi digital tidak hanya mempertahankan data historis, tetapi juga memungkinkan pemulihan aktif terhadap warisan budaya yang terfragmentasi.

Tahap selanjutnya adalah virtualisasi, di mana representasi digital gendhing dan instrumen gamelan diintegrasikan dalam suatu lingkungan virtual interaktif melalui teknologi digital twin. Model digital instrumen dibuat menggunakan teknik photogrammetry dan physics-based modeling untuk mereplikasi karakteristik visual dan akustik instrumen asli (Fontana et al., 2022). Virtualisasi memungkinkan pengguna untuk berinteraksi dengan representasi digital instrumen dan komposisi gendhing melalui platform interaktif seperti augmented reality dan virtual reality (Begault, 2020). Hal ini memperluas fungsi preservasi digital dari sekadar penyimpanan arsip menjadi suatu sistem interaktif yang mendukung pembelajaran, penelitian, dan eksplorasi musikal.

Tahap terakhir dalam model konseptual adalah validasi budaya, di mana hasil rekonstruksi dan virtualisasi dievaluasi oleh pakar gamelan dan komunitas budaya untuk memastikan kesesuaian dengan tradisi dan nilai estetika yang berlaku (Sumarsam, 2020). Proses ini penting untuk memastikan bahwa rekonstruksi berbasis kecerdasan buatan tidak hanya akurat secara teknis, tetapi juga autentik secara budaya. Validasi budaya juga berfungsi sebagai mekanisme umpan balik yang memungkinkan perbaikan model kecerdasan buatan melalui proses pembelajaran ulang. Dengan demikian, model konseptual ini bersifat adaptif, di mana sistem dapat meningkatkan akurasi dan kualitas rekonstruksi seiring dengan bertambahnya data dan umpan balik dari pakar manusia.

3.5 Proposisi Konseptual

Berdasarkan model konseptual yang diusulkan, penelitian ini merumuskan beberapa proposisi (P) konseptual yang menjelaskan hubungan antara komponen utama dalam sistem preservasi dan rekonstruksi gendhing berbasis kecerdasan buatan.

- P1: Kualitas digitalisasi arsip memiliki pengaruh positif terhadap akurasi analisis berbasis kecerdasan buatan. Digitalisasi dengan resolusi tinggi dan metadata yang lengkap memungkinkan model AI mengekstraksi pola musikal secara lebih akurat (Grant, 2017).
- P2: Efektivitas analisis berbasis kecerdasan buatan memiliki pengaruh positif terhadap kualitas rekonstruksi generatif. Analisis fitur audio dan struktur musikal yang akurat memungkinkan model generatif menghasilkan rekonstruksi yang lebih konsisten dengan struktur tradisional (Herremans & Chew, 2017; Briot et al., 2020).
- P3: Kualitas rekonstruksi generatif memiliki pengaruh positif terhadap tingkat realisme virtualisasi instrumen dan komposisi. Representasi digital yang akurat memungkinkan penciptaan model virtual yang lebih autentik secara musikal dan akustik (Engel et al., 2019).
- P4: Virtualisasi berbasis digital twin meningkatkan aksesibilitas dan utilitas warisan budaya gamelan. Representasi virtual memungkinkan pengguna untuk mengakses dan mempelajari gendhing tanpa keterbatasan geografis atau fisik (Begault, 2020).
- P5: Validasi budaya memiliki peran moderasi dalam memastikan keotentikan hasil rekonstruksi berbasis kecerdasan buatan. Keterlibatan pakar budaya membantu memastikan bahwa hasil rekonstruksi tetap sesuai dengan nilai estetika dan tradisi gamelan (Sumarsam, 2020).

3.6 Sintesis Model Konseptual

Berdasarkan komponen dan hubungan yang telah diidentifikasi, model konseptual yang diusulkan menggambarkan preservasi dan rekonstruksi gendhing sebagai suatu sistem transformasi digital yang terintegrasi, di mana kecerdasan buatan berperan sebagai mekanisme utama dalam analisis, rekonstruksi, dan virtualisasi warisan budaya musikal. Model ini mengintegrasikan pendekatan preservasi digital tradisional dengan teknologi kecerdasan buatan modern, menciptakan suatu kerangka kerja yang memungkinkan preservasi aktif, rekonstruksi adaptif, dan aksesibilitas global terhadap warisan budaya gamelan. Dengan adanya model konseptual ini, preservasi

gendhing tidak lagi terbatas pada penyimpanan arsip statis, tetapi berkembang menjadi suatu ekosistem digital dinamis yang mendukung keberlanjutan dan evolusi warisan budaya musikal.

4. IMPLIKASI TEORETIS DAN PRAKTIS

4.1 Implikasi Teoretis

Model konseptual yang diusulkan dalam penelitian ini memberikan kontribusi teoretis pada bidang ilmu komputer, khususnya dalam domain kecerdasan buatan, pemrosesan sinyal audio, dan sistem preservasi digital. Kontribusi utama terletak pada integrasi berbagai pendekatan teknologi kecerdasan buatan ke dalam suatu kerangka konseptual terpadu yang menjelaskan bagaimana preservasi, analisis, rekonstruksi, dan virtualisasi warisan budaya musikal dapat dilakukan secara sistematis.

Pertama, model ini memperluas konsep preservasi digital dari pendekatan pasif yang berfokus pada penyimpanan arsip menjadi pendekatan aktif yang mencakup analisis dan rekonstruksi berbasis kecerdasan buatan. Pendekatan preservasi digital konvensional umumnya hanya berfungsi sebagai repositori data, tanpa kemampuan untuk memulihkan atau merekonstruksi bagian data yang hilang (Oomen & Aroyo, 2011). Model konseptual yang diusulkan menunjukkan bahwa integrasi machine learning dan generative AI memungkinkan sistem preservasi digital untuk berfungsi sebagai sistem adaptif yang mampu meningkatkan kualitas representasi digital warisan budaya secara berkelanjutan.

Kedua, penelitian ini memberikan kontribusi pada bidang computational ethnomusicology dengan menyediakan kerangka konseptual yang menjelaskan bagaimana teknologi kecerdasan buatan dapat digunakan untuk menganalisis dan merekonstruksi struktur musikal tradisional. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa machine learning dapat digunakan untuk analisis pola musikal dan klasifikasi gaya (Herremans & Chew, 2017), serta bahwa generative AI dapat digunakan untuk menghasilkan komposisi musik baru (Briot et al., 2020; Huang et al., 2019). Namun, sebagian besar penelitian tersebut berfokus pada implementasi algoritma secara terpisah. Model konseptual ini mengintegrasikan berbagai teknologi tersebut ke dalam suatu sistem terpadu yang secara khusus dirancang untuk preservasi dan rekonstruksi warisan budaya musikal.

Ketiga, model ini memperkenalkan perspektif sistemik dalam penggunaan digital twin untuk preservasi budaya. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa digital twin dapat digunakan untuk merepresentasikan objek fisik dalam bentuk digital dengan tingkat akurasi yang tinggi (Engel et al., 2019; Fontana et al., 2022). Namun, integrasi digital twin dengan generative AI dalam konteks rekonstruksi musik tradisional masih relatif terbatas. Model konseptual ini menunjukkan

bahwa digital twin dapat berfungsi sebagai komponen integral dalam ekosistem preservasi digital, yang memungkinkan representasi interaktif dan imersif dari warisan budaya musikal.

Keempat, penelitian ini juga memberikan kontribusi teoretis dengan mengintegrasikan pendekatan human-in-the-loop dalam model preservasi berbasis kecerdasan buatan. Validasi budaya oleh pakar manusia berperan penting dalam memastikan bahwa hasil rekonstruksi berbasis AI tetap mempertahankan keotentikan budaya dan nilai estetika tradisional (Sumarsam, 2020). Pendekatan ini menekankan bahwa kecerdasan buatan harus diposisikan sebagai alat bantu yang mendukung, bukan menggantikan, peran manusia dalam preservasi warisan budaya.

Secara keseluruhan, model konseptual yang diusulkan memberikan dasar teoretis untuk pengembangan sistem preservasi digital berbasis kecerdasan buatan yang tidak hanya berfokus pada aspek teknis, tetapi juga mempertimbangkan dimensi budaya, estetika, dan interaksi manusia–teknologi.

4.2 Implikasi Praktis

Selain kontribusi teoretis, model konseptual yang diusulkan juga memiliki implikasi praktis yang signifikan dalam pengembangan sistem preservasi digital dan aplikasi berbasis kecerdasan buatan untuk warisan budaya musikal. Pertama, model ini dapat digunakan sebagai kerangka kerja untuk pengembangan sistem preservasi digital gamelan berbasis kecerdasan buatan. Institusi budaya, museum, dan lembaga pendidikan dapat menggunakan model ini sebagai panduan dalam merancang sistem yang mencakup digitalisasi arsip, analisis berbasis AI, rekonstruksi generatif, dan virtualisasi instrumen. Dengan pendekatan ini, preservasi gendhing dapat dilakukan secara lebih sistematis dan efektif.

Kedua, model ini mendukung pengembangan platform pembelajaran gamelan berbasis digital. Virtualisasi instrumen melalui teknologi digital twin memungkinkan pelajar untuk berinteraksi dengan instrumen virtual dan mempelajari struktur musikal gendhing tanpa memerlukan akses ke instrumen fisik (Begault, 2020). Hal ini dapat meningkatkan aksesibilitas pendidikan gamelan, terutama bagi pelajar di luar wilayah yang memiliki akses langsung ke instrumen gamelan.

Ketiga, model ini dapat digunakan dalam pengembangan sistem rekonstruksi musik berbasis kecerdasan buatan untuk tujuan penelitian dan produksi kreatif. Generative AI memungkinkan rekonstruksi komposisi yang tidak lengkap serta penciptaan representasi audio yang realistis berdasarkan data historis (Briot et al., 2020). Teknologi ini dapat digunakan oleh peneliti etnomusikologi untuk merekonstruksi repertoar yang hilang, serta oleh komposer untuk mengembangkan karya musik baru yang terinspirasi oleh tradisi gamelan.

Keempat, model ini dapat mendukung pengembangan museum virtual dan arsip digital interaktif untuk warisan budaya gamelan. Integrasi teknologi digital twin, augmented reality, dan virtual reality memungkinkan penciptaan lingkungan virtual yang memungkinkan pengguna untuk menjelajahi dan berinteraksi dengan warisan budaya secara imersif (Fontana et al., 2022). Hal ini dapat meningkatkan keterlibatan publik dan memperluas jangkauan preservasi budaya ke audiens global.

Kelima, model ini juga memiliki implikasi praktis dalam pengembangan kebijakan preservasi budaya digital. Dengan menyediakan kerangka konseptual yang jelas, model ini dapat membantu institusi budaya dan pembuat kebijakan dalam merancang strategi preservasi digital yang memanfaatkan teknologi kecerdasan buatan secara efektif, sambil tetap mempertahankan keotentikan dan integritas budaya.

Dengan demikian, model konseptual yang diusulkan tidak hanya memberikan kontribusi teoretis, tetapi juga menyediakan panduan praktis untuk pengembangan sistem preservasi digital berbasis kecerdasan buatan yang mendukung keberlanjutan warisan budaya musikal di era digital.

5. KESIMPULAN DAN ARAH PENELITIAN SELANJUTNYA

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini mengusulkan suatu model konseptual untuk preservasi dan rekonstruksi gendhing gamelan berbasis kecerdasan buatan yang mengintegrasikan proses digitalisasi arsip, analisis berbasis machine learning, rekonstruksi menggunakan generative AI, serta virtualisasi instrumen melalui teknologi digital twin. Model konseptual ini dikembangkan sebagai respons terhadap berbagai tantangan dalam preservasi warisan budaya musikal, termasuk degradasi arsip historis, keterbatasan dokumentasi, variasi gaya regional, dan keterbatasan akses terhadap instrumen fisik dan sumber pembelajaran (Supanggah, 2007; Sumarsam, 2020).

Model yang diusulkan memandang preservasi digital sebagai suatu proses transformasi bertingkat yang melibatkan lima lapisan utama, yaitu digitalisasi arsip, analisis berbasis kecerdasan buatan, rekonstruksi generatif, virtualisasi instrumen, dan validasi budaya. Setiap lapisan berperan dalam mentransformasikan data arsip menjadi representasi digital yang lebih lengkap, akurat, dan dapat diakses secara interaktif. Integrasi machine learning dan neural audio restoration memungkinkan peningkatan kualitas arsip audio historis (Défossez et al., 2019), sementara generative AI memungkinkan rekonstruksi bagian komposisi yang hilang berdasarkan pola struktural yang dipelajari dari dataset musik (Briot et al., 2020; Huang et al., 2019). Selanjutnya, teknologi digital twin memungkinkan representasi virtual instrumen gamelan yang dapat digunakan untuk tujuan pendidikan, penelitian, dan preservasi interaktif (Engel et al., 2019; Fontana et al., 2022).

Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan kerangka konseptual yang menjelaskan hubungan antara berbagai teknologi kecerdasan buatan dalam suatu ekosistem preservasi digital yang terintegrasi. Model ini menunjukkan bahwa kecerdasan buatan dapat berperan sebagai mekanisme utama dalam meningkatkan kualitas, kelengkapan, dan aksesibilitas representasi digital warisan budaya musikal. Selain itu, integrasi lapisan validasi budaya menegaskan pentingnya keterlibatan pakar manusia dalam memastikan bahwa hasil rekonstruksi tetap mempertahankan keotentikan budaya dan nilai estetika tradisional (Sumarsam, 2020). Dengan demikian, model konseptual yang diusulkan memberikan dasar teoretis dan praktis untuk pengembangan sistem preservasi digital berbasis kecerdasan buatan yang mendukung keberlanjutan warisan budaya gamelan di era digital.

6.2 Arah Penelitian Selanjutnya

Model konseptual yang diusulkan memberikan kerangka sistematis untuk preservasi dan rekonstruksi gendhing berbasis kecerdasan buatan, tetapi penelitian ini masih bersifat konseptual dan belum mencakup implementasi empiris secara langsung. Oleh karena itu, terdapat beberapa arah penelitian selanjutnya yang dapat dilakukan untuk mengembangkan dan memvalidasi model ini. Pertama, penelitian selanjutnya dapat berfokus pada implementasi sistem berbasis model konseptual yang diusulkan. Hal ini dapat mencakup pengembangan prototipe sistem yang mengintegrasikan digitalisasi arsip, analisis berbasis machine learning, dan rekonstruksi generatif untuk dataset gamelan tertentu. Implementasi empiris ini akan memungkinkan evaluasi efektivitas model dalam konteks nyata.

Kedua, penelitian selanjutnya dapat mengevaluasi akurasi rekonstruksi generatif yang dihasilkan oleh model kecerdasan buatan dengan membandingkan hasil rekonstruksi dengan komposisi asli atau dengan evaluasi oleh pakar gamelan. Pendekatan ini dapat memberikan validasi empiris terhadap proposisi konseptual yang diusulkan dalam penelitian ini.

Ketiga, penelitian selanjutnya dapat mengeksplorasi integrasi model konseptual ini dengan teknologi interaktif seperti augmented reality dan virtual reality untuk pengembangan platform pembelajaran gamelan berbasis digital twin. Integrasi ini dapat meningkatkan aksesibilitas dan efektivitas pembelajaran gamelan di tingkat global.

Keempat, penelitian selanjutnya juga dapat mengkaji aspek etika dan sosial dalam penggunaan kecerdasan buatan untuk preservasi warisan budaya, termasuk isu keotentikan, kepemilikan budaya, dan keterlibatan komunitas dalam proses preservasi digital. Pendekatan ini penting untuk memastikan bahwa penggunaan teknologi kecerdasan buatan mendukung, bukan menggantikan, peran komunitas budaya dalam menjaga warisan tradisional.

Akhirnya, model konseptual yang diusulkan dalam penelitian ini dapat diperluas untuk diterapkan pada bentuk warisan budaya lainnya, seperti musik tradisional dari budaya lain, seni pertunjukan, atau artefak budaya non-musikal. Dengan demikian, model ini memiliki potensi untuk menjadi dasar bagi pengembangan sistem preservasi digital berbasis kecerdasan buatan yang lebih luas dalam konteks warisan budaya global.

REFERENSI

- Allan, M., & Williams, C. K. I. (2005). Harmonising chorales by probabilistic inference. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 17, 25–32.
- Begault, D. R. (2020). *3D sound for virtual reality and multimedia*. Academic Press.
- Becker, J. (1980). *Traditional music in modern Java: Gamelan in a changing society*. University of Hawaii Press.
- Bilbao, S., & Torin, A. (2019). Numerical modeling of plate vibration and sound generation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 145(3), 1617–1628.
- Briot, J.-P., Hadjeres, G., & Pachet, F.-D. (2020). *Deep learning techniques for music generation*. Springer.
- Choi, K., Fazekas, G., Sandler, M., & Cho, K. (2020). Convolutional recurrent neural networks for music classification. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2392–2396.
- Défossez, A., Usunier, N., Bottou, L., & Bach, F. (2019). Music source separation in the waveform domain. *Proceedings of the International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*, 1–8.
- Engel, J., Hantrakul, L., Gu, C., & Roberts, A. (2019). DDSP: Differentiable digital signal processing. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
- Fontana, F., Avanzini, F., & Rocchesso, D. (2022). Physics-based sound synthesis and virtual musical instruments. *Computer Music Journal*, 46(1), 12–28.
- Gasson, M. N. (2021). Human–machine interaction and the ethics of artificial intelligence. *AI & Society*, 36(1), 1–12.
- Gervais, D. J. (2021). Artificial intelligence and intellectual property: A primer. *Journal of Intellectual Property Law*, 29(1), 1–30.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.
- Grant, C. (2017). Preservation and access in ethnomusicology archives. *Ethnomusicology Forum*, 26(1), 21–36.
- Herremans, D., & Chew, E. (2017). Music generation and analysis using machine learning. *IEEE MultiMedia*, 24(1), 30–41.
- Huang, C. A., Vaswani, A., Uszkoreit, J., Shazeer, N., Simon, I., Hawthorne, C., Dai, A. M., Hoffman, M. D., Dinculescu, M., & Eck, D. (2019). Music transformer: Generating music with long-term structure. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
- Kartomi, M. (2011). Traditional music archives and preservation. *Archiv für Musikwissenschaft*, 68(3), 145–162.
- Kingma, D. P., & Welling, M. (2014). Auto-encoding variational Bayes. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
- Lindsay, J. (1992). *Javanese gamelan*. Oxford University Press.
- Morise, M., Yokomori, F., & Ozawa, K. (2016). WORLD: A vocoder-based speech synthesis system. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E99-D(7), 1877–1884.
- Oomen, J., & Aroyo, L. (2011). Crowdsourcing in cultural heritage. *International Journal of Humanities and Arts Computing*, 5(2), 138–149.
- Perlman, M. (2004). *Unplayed melodies: Javanese gamelan and the genesis of music theory*. University of California Press.

- Prasetyo, H. (2021). Digital restoration of historical audio recordings. *Journal of Audio Engineering Society*, 69(4), 245–256.
- Roberts, A., Engel, J., Raffel, C., Hawthorne, C., & Eck, D. (2020). Music generation with deep learning. *IEEE MultiMedia*, 27(1), 36–45.
- Spiller, H. (2008). *Focus: Gamelan music of Indonesia*. Routledge.
- Stöter, F.-R., Liutkus, A., & Ito, N. (2019). Open-Unmix: A reference implementation for music source separation. *Journal of Open Source Software*, 4(41), 1667.
- Sumarsam. (2013). *Javanese gamelan and the West*. University of Rochester Press.
- Sumarsam. (2020). *Gamelan: Cultural interaction and musical development in Central Java*. University of Chicago Press.
- Supanggah, R. (2007). *Bothekan karawitan I*. Ford Foundation dan Masyarakat Seni Pertunjukan Indonesia.
- UNESCO. (2014). *Intangible cultural heritage and traditional music preservation*. UNESCO Publishing.
- Vincent, P., Larochelle, H., Bengio, Y., & Manzagol, P.-A. (2010). Stacked denoising autoencoders. *Journal of Machine Learning Research*, 11, 3371–3408.