JOURNAL OF HUMAN AND EDUCATION

E-ISSN: 2776-5857 | P-ISSN: 2776-7876
Website: https://jahe.or.id/index.php/jahe
Vol. 6, No. 6 (Tahun)

Model Difusi Teknologi Dan Pelatihan Penerapan Pencetakan Tiga Dimensi Berbahan Pla Untuk Pendidikan Pangan Dan Lingkungan Anak Usia Dini

Hendra Susanto[1*], Umi Fitriyati[2], Nila Rahmawati[3], Jasmine Nurul Izza[4], Celiacika Gustisiwi[5]
[1,2,4,5]Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Malang, Indonesia
[3]Sekolah Pascasarjana, Universitas Negeri Malang, Indonesia
**Email Korespondensi: hendrabio@um.ac.id*

ABSTRAK

Pencetakan tiga dimensi berbahan *polylactic acid* (PLA) berpotensi mendukung penyediaan media konkret pendidikan anak usia dini, tetapi penerapannya menghadapi persoalan ketepatan klaim keberlanjutan, keselamatan, dan kompleksitas adopsi teknologi. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model difusi teknologi dan pelatihan penerapan pencetakan tiga dimensi berbahan PLA untuk pendidikan pangan dan lingkungan anak usia dini. Penelitian menggunakan pendekatan *research and development* dengan mengadaptasi tahapan awal *design-based research* yang meliputi analisis kebutuhan, pengembangan model, validasi ahli, dan penyempurnaan produk. Validasi melibatkan dua ahli PAUD, dua ahli material, dan dua ahli keselamatan dengan 36 indikator penilaian, kemudian dianalisis melalui rerata multidimensi, persentase kelayakan, dan analisis kesenjangan kualitas. Hasil pengembangan berupa model enam sintaks yang dilengkapi empat tingkatan peran, empat zona kegiatan, dan modul pelatihan berbasis kompetensi pengguna. Persentase kelayakan mencapai 90,00% menurut ahli PAUD, 84,17% menurut ahli material, dan 80,83% menurut ahli keselamatan, dengan kelayakan gabungan 85,00%. Kesenjangan kualitas terbesar terdapat pada pengelolaan limbah dan keselamatan fisik media. Model layak secara konseptual dengan revisi prioritas pada aspek keselamatan dan pengelolaan limbah, sedangkan keamanan produk fisik dan efektivitas pembelajaran memerlukan pengujian lanjutan.

Kata Kunci: difusi teknologi, pencetakan tiga dimensi, *polylactic acid*, pendidikan anak usia dini, validasi ahli

ABSTRACT

Three-dimensional (3D) printing with polylactic acid (PLA) can support the provision of concrete learning media in early childhood education, yet its implementation raises concerns regarding the accuracy of sustainability claims, safety, and the complexity of technology adoption. This study aimed to develop a technology diffusion and training model for implementing PLA-based 3D printing in early childhood food and environmental education. A research and development approach was employed by adapting the initial stages of design-based research, comprising needs analysis, model development, expert validation, and product refinement. Validation involved two early childhood education experts, two materials experts, and two safety experts using 36 assessment indicators, and the data were analysed through multidimensional means, feasibility percentages, and quality gap

analysis. The study produced a six-phase model supported by four role levels, four activity zones, and competency-based training modules. Feasibility reached 90.00% according to early childhood education experts, 84.17% according to materials experts, and 80.83% according to safety experts, with a combined feasibility of 85.00%. The largest quality gaps were found in waste management and the physical safety of learning media. The model is conceptually feasible, with priority revisions on safety and waste management, while physical product safety and learning effectiveness require further testing.
Keywords: *technology diffusion, three-dimensional printing, polylactic acid, early childhood education, expert validation*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi manufaktur aditif membuka peluang baru dalam pengembangan media pembelajaran yang konkret, interaktif, dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan peserta didik. Salah satu teknologi yang semakin memperoleh perhatian adalah pencetakan tiga dimensi atau *three-dimensional printing* (3D *printing*), yaitu pembuatan objek fisik berdasarkan rancangan digital melalui penambahan material secara berlapis. Teknologi ini memberikan keleluasaan dalam menghasilkan alat peraga dengan bentuk, ukuran, dan karakteristik visual yang sesuai dengan tujuan pembelajaran. Dalam konteks pendidikan anak usia dini (PAUD), pencetakan tiga dimensi berpotensi menghadirkan media yang mendukung pengenalan konsep pangan, lingkungan, bentuk alam, dan objek kehidupan sehari-hari. Ketersediaan media konkret menjadi penting karena anak usia dini memperoleh pengalaman belajar melalui aktivitas mengamati, menyentuh, memanipulasi, dan mengeksplorasi benda di sekitarnya. Namun, penerapan teknologi tersebut tidak cukup didasarkan pada kemampuan menghasilkan objek yang menarik, tetapi juga perlu mempertimbangkan kesesuaian dengan perkembangan anak, keamanan penggunaan, kapasitas lembaga, dan konsekuensi lingkungan dari material yang digunakan.

Salah satu material yang umum digunakan dalam pencetakan tiga dimensi adalah *polylactic acid* (PLA) atau asam polilaktat, yaitu polimer yang dapat diproduksi dari sumber daya terbarukan seperti jagung dan tebu. Karakteristik mekanis dan termal PLA mendukung penggunaannya dalam berbagai proses manufaktur aditif, termasuk pembuatan prototipe dan media pembelajaran. Ranakoti dkk. (2022) menguraikan struktur, sifat, dan teknologi pemrosesan PLA yang menunjukkan potensi material tersebut dalam berbagai aplikasi. PLA sering dikaitkan dengan inovasi yang lebih ramah lingkungan karena bahan bakunya dapat diperbarui dan sebagian produknya dapat diolah melalui pengomposan industri. Akan tetapi, label ramah lingkungan yang digunakan secara umum berpotensi menimbulkan kesalahpahaman apabila tidak disertai penjelasan mengenai kondisi penguraian, pengelolaan limbah, dan dampak material setelah masa pakainya berakhir. Persoalan ini menjadi semakin penting ketika PLA digunakan untuk mengembangkan media pendidikan lingkungan, karena karakteristik material seharusnya tidak bertentangan dengan substansi pembelajaran yang disampaikan.

Meskipun PLA sering digolongkan sebagai material yang dapat dikomposkan, kemampuan penguraiannya bergantung pada persyaratan lingkungan tertentu. Craplewe dkk. (2023) menjelaskan bahwa pengomposan PLA terutama berlangsung pada kondisi pengolahan industri, sedangkan penguraian di berbagai lingkungan pembuangan berlangsung relatif lambat. Royer dkk. (2023) menunjukkan bahwa PLA tidak mengalami penguraian berarti selama lebih dari 428 hari pengamatan di lingkungan laut, sehingga sifat dapat dikomposkan tidak dapat disamakan dengan kemampuan terurai

secara alami di semua kondisi. Temuan tersebut memperlihatkan perbedaan mendasar antara bahan yang berasal dari sumber terbarukan, bahan yang dapat dikomposkan secara industri, dan bahan yang dapat terurai pada kondisi lingkungan biasa. Ketiga karakteristik tersebut sering diperlakukan seolah-olah bermakna sama, padahal masing-masing memiliki konsekuensi ilmiah yang berbeda. Oleh karena itu, penggunaan PLA dalam media pembelajaran perlu disertai informasi yang akurat agar guru dan peserta didik tidak memperoleh pemahaman keliru mengenai pengelolaan sampah, keberlanjutan material, dan tanggung jawab terhadap lingkungan.

Ketidaktepatan pemahaman mengenai sifat material dapat menimbulkan kontradiksi pedagogis yang mendasar. Pendidikan lingkungan bertujuan membangun kesadaran untuk mengurangi limbah, menggunakan sumber daya secara bijaksana, dan berperilaku bertanggung jawab terhadap alam. Apabila media pembelajaran dibuat dari plastik yang tidak mudah terurai pada lingkungan biasa, tetapi disertai klaim bahwa material tersebut dapat kembali ke alam tanpa konsekuensi, terjadi ketidaksesuaian antara pesan pembelajaran dan karakteristik media. Dalam PAUD, kontradiksi ini memiliki implikasi khusus karena anak membangun pemahaman melalui pengalaman langsung dengan benda. Media tidak sekadar menjadi sarana penyampaian informasi, tetapi turut membentuk persepsi anak mengenai hubungan manusia dengan lingkungan. Oleh sebab itu, pengembangan model penerapan pencetakan tiga dimensi perlu menempatkan kejujuran klaim keberlanjutan sebagai prinsip utama, termasuk membatasi pernyataan mengenai sifat material pada informasi yang didukung bukti ilmiah. Penggunaan teknologi juga perlu diarahkan pada pembuatan media yang benar-benar diperlukan, dapat digunakan berulang, dan memiliki nilai edukatif yang sepadan dengan sumber daya yang digunakan.

Selain persoalan keberlanjutan, pencetakan tiga dimensi memiliki risiko keselamatan yang perlu diperhatikan secara serius, terutama di lingkungan PAUD. Proses pemanasan dan ekstrusi filamen dapat menghasilkan partikel ultrahalus serta senyawa organik mudah menguap yang berpotensi mencemari udara dalam ruang. Azimi dkk. (2016) menunjukkan bahwa emisi partikel selama pencetakan bervariasi menurut karakteristik mesin dan material yang digunakan. Zhang dan Black (2023) memperkuat temuan tersebut melalui konsolidasi data emisi dari berbagai pengujian pencetakan tiga dimensi. U.S. Environmental Protection Agency (t.t.) juga menyoroti potensi paparan partikel ultrahalus pada anak akibat pengoperasian pencetak tiga dimensi yang tidak terkendali di ruang tertutup, termasuk ruang kelas dan perpustakaan. Meskipun emisi PLA cenderung lebih rendah dibandingkan beberapa jenis filamen lain, proses pencetakan tidak sepenuhnya bebas risiko. Anak usia dini memerlukan perlindungan khusus karena karakteristik fisiologis dan pola aktivitasnya dapat meningkatkan kerentanan terhadap paparan lingkungan yang tidak terkendali.

Risiko tersebut menuntut pengaturan penggunaan teknologi yang tidak hanya bertumpu pada prosedur pengoperasian mesin, tetapi juga pada pemisahan ruang dan pembagian tanggung jawab. Pencetakan seharusnya dilakukan di ruang produksi terpisah dengan pengendalian ventilasi dan emisi yang memadai, bukan di ruang yang digunakan anak untuk belajar dan bermain. Tahap penyelesaian benda, seperti pelepasan material penyangga, penghalusan permukaan, dan pembersihan, juga memerlukan pengendalian tersendiri sebelum media digunakan dalam pembelajaran. Pengaturan ini berimplikasi pada aspek kelembagaan karena tidak semua lembaga PAUD memiliki ruang, fasilitas, tenaga teknis, atau anggaran untuk mengoperasikan mesin secara mandiri. Dengan demikian, model difusi teknologi perlu mempertimbangkan penyediaan layanan produksi melalui kerja sama dengan

pihak yang memiliki kompetensi dan fasilitas memadai, sementara guru tetap berperan menentukan kebutuhan pedagogis dan memastikan kesesuaian media dengan karakteristik anak.

Kebutuhan terhadap media pembelajaran konkret tetap menjadi landasan penting bagi inovasi ini. Yee dkk. (2022) melalui tinjauan sistematis menunjukkan kontribusi pembelajaran melalui bermain terhadap perkembangan anak, sedangkan Alotaibi (2024) menunjukkan potensi pembelajaran berbasis permainan dalam mendukung aspek kognitif, sosial, dan emosional. Keberhasilan pendekatan tersebut juga dipengaruhi oleh cara pendidik merancang dan memfasilitasi pengalaman bermain (Danniels & Pyle, 2022). Dalam konteks pengembangan media, Qiu (2024) menekankan keseimbangan antara nilai pendidikan, keamanan, dan daya tarik produk, sementara Fan dkk. (2024) menunjukkan pentingnya kesesuaian kompleksitas desain dengan tahap perkembangan pengguna. Istenič dkk. (2023) juga memperlihatkan pertimbangan orang tua terhadap penggunaan teknologi digital dalam pengasuhan, sehingga pengalaman belajar melalui benda fisik tetap memiliki nilai tersendiri. Berbagai temuan tersebut menunjukkan bahwa pencetakan tiga dimensi dapat mendukung pembelajaran apabila media yang dihasilkan benar-benar memberikan pengalaman eksploratif yang sesuai, bukan semata-mata menawarkan kebaruan bentuk atau kecanggihan teknologi.

Dalam pendidikan pangan dan lingkungan, media konkret memungkinkan anak mengenali bentuk bahan makanan, jenis tanaman, bagian tumbuhan, serta hubungan antara aktivitas manusia dan lingkungan sekitarnya. Namun, pengembangan media harus tetap memperhatikan prinsip keselamatan, termasuk ukuran komponen, risiko tersedak, ketahanan struktur, kebersihan, dan karakteristik permukaan. Benda hasil pencetakan berlapis dapat memiliki celah halus yang menyulitkan pembersihan, sedangkan konstruksi yang kurang kuat berpotensi menghasilkan pecahan atau bagian bertepi tajam. Oleh karena itu, pengembangan media tidak cukup berhenti pada keberhasilan pencetakan, tetapi harus mencakup evaluasi desain dan pemeriksaan keamanan berdasarkan karakteristik pengguna. Prinsip ini menegaskan bahwa kualitas teknologi manufaktur tidak dapat dipisahkan dari kualitas pedagogis dan keselamatan produk yang dihasilkan.

Pendidikan lingkungan anak usia dini juga menuntut pendekatan yang membangun keterhubungan emosional dan pengalaman langsung dengan alam. Sunassee dan Bokhoree (2021) menunjukkan bahwa kurikulum lingkungan berbasis tempat dapat menumbuhkan empati ekologis melalui pengalaman yang dekat dengan kehidupan peserta didik. Ison dan Bramwell-Lalor (2023) menjelaskan kontribusi pendekatan artistik dalam memperkuat hubungan peserta didik dengan lingkungan, sedangkan Şeren dan Gül (2022) menunjukkan bahwa kegiatan pendidikan lingkungan yang dirancang secara terarah dapat mencakup aspek kognitif, afektif, dan perilaku. Temuan tersebut menjadi dasar bahwa pemanfaatan pencetakan tiga dimensi perlu mendukung pengalaman bermain, kreativitas, dan pengenalan lingkungan yang bermakna. Media yang dikembangkan seharusnya membantu anak membangun hubungan dengan objek dan fenomena di sekitarnya tanpa mengurangi kesempatan berinteraksi langsung dengan alam atau memanfaatkan material yang sudah tersedia.

Persoalan berikutnya berkaitan dengan cara teknologi diperkenalkan dan diadopsi oleh guru serta lembaga PAUD. Pengoperasian pencetak tiga dimensi membutuhkan kemampuan teknis, mulai dari pengelolaan berkas digital, pengaturan pencetakan, dan pemeliharaan mesin hingga penanganan kegagalan produksi. Tuntutan tersebut berpotensi menambah beban kerja guru apabila seluruh

kemampuan teknis dijadikan prasyarat penggunaan media. Oleh karena itu, model difusi teknologi perlu membedakan peran pengguna, pemilih media, operator, dan perancang. Guru tidak harus menguasai seluruh proses produksi untuk dapat memanfaatkan media secara pedagogis. Pembagian peran memungkinkan guru berfokus pada perancangan pengalaman belajar, sedangkan pekerjaan teknis dilaksanakan oleh tenaga yang kompeten. Pendekatan ini juga membuka peluang kerja sama antarlembaga dan pemanfaatan fasilitas produksi bersama sehingga adopsi teknologi tidak bergantung pada kepemilikan mesin oleh setiap satuan pendidikan.

Berdasarkan uraian tersebut, diperlukan model difusi teknologi dan pelatihan pencetakan tiga dimensi berbahan PLA yang mengintegrasikan ketepatan informasi material, keselamatan penggunaan, relevansi pedagogis, dan keterjangkauan penerapan. Model tersebut tidak semata-mata ditujukan untuk meningkatkan keterampilan mengoperasikan mesin, tetapi juga untuk membantu lembaga menentukan kapan pencetakan tiga dimensi layak digunakan dan kapan alternatif lain lebih sesuai. Kebaruan penelitian ini terletak pada penempatan kejujuran klaim keberlanjutan, pemisahan ruang produksi, dan penyederhanaan peran guru sebagai prinsip dasar difusi teknologi. Penelitian ini juga merumuskan kriteria untuk tidak melakukan pencetakan apabila media dapat diperoleh atau dibuat melalui alternatif yang lebih aman, hemat sumber daya, dan relevan dengan tujuan pendidikan lingkungan. Sejalan dengan hal tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan model difusi teknologi dan pelatihan penerapan pencetakan tiga dimensi berbahan PLA untuk pendidikan pangan dan lingkungan anak usia dini serta menguji kelayakannya melalui validasi ahli PAUD, ahli material, dan ahli keselamatan. Dengan demikian, pemanfaatan pencetakan tiga dimensi di PAUD diharapkan tidak hanya menghasilkan media pembelajaran yang inovatif, tetapi juga membangun praktik pendidikan pangan dan lingkungan yang bertanggung jawab, aman, dan konsisten dengan prinsip keberlanjutan.

METODE

1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *research and development* (R&D) dengan mengadaptasi tahapan awal *design-based research* (DBR) yang difokuskan pada pengembangan dan validasi kelayakan model difusi teknologi pencetakan tiga dimensi berbahan PLA untuk pendidikan pangan dan lingkungan anak usia dini. Pendekatan DBR dipilih karena memungkinkan pengembangan solusi pendidikan melalui integrasi analisis kebutuhan, perancangan model, evaluasi sistematis, dan penyempurnaan berdasarkan masukan ahli (Design-Based Research Collective, 2003). Pendekatan ini juga memungkinkan pertimbangan pedagogis, karakteristik teknologi, keselamatan, dan keberlanjutan dipadukan dalam pengembangan model yang kontekstual (Schmalenbach & Ashouri, 2025). Cakupan penelitian dibatasi sampai tahap validasi ahli dan revisi prototipe, tanpa melibatkan uji coba kepada anak, implementasi pelatihan guru, maupun pengukuran efektivitas pembelajaran.

2. Prosedur Pengembangan

Prosedur pengembangan dilaksanakan dalam tiga tahap, yaitu analisis kebutuhan dan pemetaan risiko; pengembangan model difusi teknologi beserta perangkat pelatihan; serta validasi ahli dan penyempurnaan produk. Tahap pertama diarahkan pada identifikasi kebutuhan media konkret untuk pendidikan pangan dan lingkungan, karakteristik perkembangan anak usia dini, dan potensi penggunaan

teknologi pencetakan tiga dimensi. Analisis juga mencakup kajian sifat material PLA, risiko emisi selama pencetakan, kemungkinan bahaya fisik pada media, dan konsekuensi limbah produksi. Hasil pemetaan menjadi dasar perumusan tiga prinsip pengembangan, yaitu ketepatan klaim keberlanjutan, pemisahan ruang produksi dari lingkungan anak, dan penyederhanaan peran guru dalam proses adopsi teknologi.

Tahap kedua mencakup perancangan model difusi teknologi yang mengintegrasikan pembagian peran, pengaturan zona kegiatan, prosedur pemeriksaan keselamatan, dan modul pelatihan. Pembagian peran disusun dalam empat tingkatan, yaitu pengguna media, pemilih desain, operator pencetakan, dan perancang model tiga dimensi. Kegiatan dibedakan ke dalam zona produksi, penyelesaian, pemeriksaan, dan penggunaan media. Pencetakan dan penyelesaian hanya dilakukan pada fasilitas terpisah yang memiliki pengendalian risiko memadai. Model juga dilengkapi matriks keputusan untuk menentukan kondisi ketika media sebaiknya dicetak, dibeli, atau dibuat dari bahan alternatif. Perangkat pengembangan meliputi panduan pelatihan, diagram pembagian peran, prosedur keselamatan, lembar pemeriksaan media, dan panduan pengelolaan limbah PLA.

Tahap ketiga berupa validasi kelayakan rancangan oleh ahli PAUD, ahli material, dan ahli keselamatan. Hasil penilaian kuantitatif dan rekomendasi perbaikan digunakan untuk menyempurnakan substansi modul, prosedur keselamatan, dan mekanisme penerapan model. Revisi dilakukan dengan memprioritaskan indikator kritis yang berkaitan dengan keamanan anak, akurasi informasi material, dan pengendalian risiko pencetakan.

3. Validator dan Instrumen Penelitian

Validasi melibatkan enam validator yang dipilih secara *purposive* berdasarkan kesesuaian keahlian dan pengalaman profesional, terdiri atas dua ahli PAUD, dua ahli material, dan dua ahli keselamatan. Ahli PAUD mengevaluasi kesesuaian pedagogis dan perkembangan anak; ahli material menilai ketepatan karakteristik PLA dan keberlanjutan penggunaannya; sedangkan ahli keselamatan mengevaluasi pengendalian risiko proses pencetakan dan keamanan desain media. Instrumen menggunakan skala Likert lima tingkat dengan 36 indikator yang terbagi ke dalam tiga instrumen penilaian sebagaimana disajikan pada Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3.

Tabel 1. Kisi-Kisi Instrumen Validasi Ahli PAUD

Dimensi	Indikator Operasional	Butir
Kesesuaian perkembangan anak	Kesesuaian tahap perkembangan; ketepatan kompleksitas bentuk; kesesuaian karakteristik interaksi	1–3
Relevansi pedagogis	Kesesuaian capaian pembelajaran; ketepatan substansi pangan dan lingkungan; dukungan eksplorasi konkret	4–6
Desain pengalaman bermain	Keterbukaan aktivitas bermain; dukungan eksplorasi multisensori; kesesuaian penggunaan dengan pendampingan guru	7–9
Keterterapan model	Kejelasan panduan guru; kesesuaian pembagian peran; kelayakan integrasi media dalam kegiatan PAUD	10–12

Tabel 2. Kisi-Kisi Instrumen Validasi Ahli Material

Dimensi	Indikator Operasional	Butir
Akurasi karakteristik PLA	Ketepatan sifat material; kesesuaian karakteristik termal dan mekanis; ketepatan batas penggunaan	1–3
Validitas klaim keberlanjutan	Kejelasan sumber terbarukan; ketepatan persyaratan pengomposan industri; ketiadaan klaim penguraian yang menyesatkan	4–6
Kualitas material dan produk	Ketahanan struktur; kesesuaian karakteristik permukaan; ketepatan pertimbangan parameter pencetakan	7–9
Pengelolaan limbah	Identifikasi limbah produksi; strategi pengurangan kegagalan; ketepatan prosedur penanganan sisa material	10–12

Tabel 3. Kisi-Kisi Instrumen Validasi Ahli Keselamatan

Dimensi	Indikator Operasional	Butir
Pengendalian paparan	Ketepatan pemisahan ruang; kecukupan rancangan ventilasi dan pengendalian emisi; pencegahan paparan terhadap anak	1–3
Keselamatan fisik media	Pengendalian bahaya tersedak; ketiadaan tepi tajam; pemeriksaan potensi patahan dan serpihan	4–6
Higiene dan kelayakan penggunaan	Kemudahan pembersihan; kesesuaian penggunaan berdasarkan usia; kejelasan prosedur pemeriksaan sebelum penggunaan	7–9
Manajemen risiko operasional	Kejelasan prosedur kerja aman; ketepatan pembagian tanggung jawab; kelengkapan penanganan kegagalan dan penghentian penggunaan	10–12

Setiap indikator dijabarkan menjadi pernyataan penilaian dengan rentang skor 1–5, dari sangat tidak sesuai hingga sangat sesuai. Instrumen juga dilengkapi kolom komentar untuk mencatat rekomendasi perbaikan. Aspek yang menyangkut keselamatan anak dan ketepatan klaim material ditetapkan sebagai indikator kritis yang harus dipenuhi sebelum model direkomendasikan untuk tahap pengujian berikutnya.

4. Teknik Analisis Data

Data validasi dianalisis secara kuantitatif menggunakan statistik deskriptif multidimensi melalui perhitungan rerata, simpangan baku, persentase kelayakan, dan indeks kualitas setiap dimensi. Persentase kelayakan diperoleh dengan membandingkan jumlah skor penilaian dengan skor maksimum, sedangkan rerata setiap dimensi dibandingkan dengan target operasional 4,20 (setara 84%) untuk menentukan kesenjangan kualitas. Analisis dilakukan secara terpisah untuk ahli PAUD, ahli material, dan ahli keselamatan guna mempertahankan karakteristik setiap kelompok penilai. Relevansi isi indikator dapat dianalisis menggunakan koefisien Aiken's V dengan interpretasi yang hati-hati karena setiap kelompok hanya terdiri atas dua validator. Perbedaan skor antarvalidator juga diperiksa untuk mengidentifikasi indikator yang memerlukan penelaahan lebih lanjut.

Kelayakan produk dievaluasi melalui skor multidimensi dan pemeriksaan persyaratan kritis secara nonkompensatoris. Artinya, skor tinggi pada aspek pedagogis tidak dapat menutupi kelemahan pada aspek keselamatan atau ketepatan klaim material. Rekomendasi kualitatif validator dianalisis berdasarkan substansi, desain media, pengendalian risiko, dan keterterapan model untuk menentukan prioritas revisi. Kesimpulan penelitian dibatasi pada kelayakan konseptual model dan perangkat pelatihan berdasarkan penilaian ahli. Validasi ini tidak diperlakukan sebagai sertifikasi keamanan produk atau pengganti pengujian fisik terhadap standar keselamatan mainan yang berlaku.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Pengembangan Model Difusi Teknologi Pencetakan Tiga Dimensi

Pengembangan model difusi teknologi pencetakan tiga dimensi berbahan PLA menghasilkan rancangan integratif yang menghubungkan kebutuhan pedagogis PAUD, karakteristik material, keselamatan penggunaan, dan keterjangkauan teknologi. Model dikembangkan berdasarkan prinsip bahwa keberhasilan adopsi teknologi pendidikan tidak semata-mata ditentukan oleh kecanggihan peralatan atau kemampuan menghasilkan media, tetapi juga oleh kesesuaian teknologi dengan kebutuhan pengguna, kapasitas kelembagaan, dan kemampuan mengendalikan risiko selama produksi dan penggunaan. Dalam model ini, pencetakan tiga dimensi ditempatkan sebagai salah satu alternatif penyediaan media yang harus dipertimbangkan secara selektif, bukan sebagai teknologi yang selalu lebih unggul daripada media konvensional.

Arsitektur model disusun berdasarkan tiga landasan utama, yaitu kejujuran informasi material, keselamatan proses produksi dan penggunaan media, serta keterjangkauan adopsi melalui pembagian peran yang proporsional. Landasan pertama menegaskan bahwa PLA merupakan polimer berbasis sumber daya terbarukan yang dapat dikomposkan pada kondisi industri tertentu, tetapi tidak dapat dinyatakan mudah terurai di lingkungan alami (Ranakoti dkk., 2022; Craplewe dkk., 2023; Royer dkk., 2023). Landasan kedua menempatkan pengendalian paparan partikel ultrahalus dan senyawa organik mudah menguap sebagai persyaratan utama (Azimi dkk., 2016; Zhang & Black, 2023; U.S. Environmental Protection Agency, t.t.). Landasan ketiga menekankan pengurangan kompleksitas teknologi yang harus dikuasai guru sehingga pemanfaatan media tidak bergantung pada kemampuan mengoperasikan mesin atau membuat model digital secara mandiri.

Hasil perancangan diwujudkan dalam model difusi dan pelatihan yang melibatkan empat tingkatan peran, yaitu pengguna media, pemilih desain, operator pencetakan, dan perancang model tiga dimensi. Model tersebut dilengkapi pengaturan zona produksi, zona penyelesaian, zona pemeriksaan, dan zona penggunaan. Pengorganisasian ini membentuk alur yang memisahkan pekerjaan teknis dari aktivitas pedagogis sehingga guru dapat berfokus pada pemilihan dan pemanfaatan media sesuai karakteristik perkembangan anak.

Kontribusi pengembangan ini terletak pada rumusan model adopsi teknologi yang tidak mewajibkan seluruh guru menguasai proses manufaktur. Guru dapat berperan sebagai pengguna atau pemilih media, sedangkan pencetakan dan perancangan digital dilakukan oleh tenaga yang memiliki kompetensi teknis. Pendekatan ini sejalan dengan pemikiran mengenai peran kelembagaan dan kolaborasi komunitas dalam penyediaan sumber daya teknologi pendidikan (Detlor dkk., 2022; Darmawan dkk., 2025; Noya dkk., 2023).

2. Sintaks Model Difusi Teknologi dan Pelatihan Pencetakan Tiga Dimensi

Hasil pengembangan berikutnya berupa sintaks model yang mengintegrasikan identifikasi kebutuhan, literasi material, perancangan media, pengorganisasian produksi, dan evaluasi kelayakan. Sintaks terdiri atas enam fase yang menghubungkan keputusan pedagogis dengan penggunaan teknologi (Tabel 4). Keenam fase merupakan rancangan prosedural untuk pengembangan media PAUD; keterlaksanaan dan efektivitasnya belum diuji karena penelitian ini dibatasi sampai tahap validasi ahli.

Tabel 4. Sintaks Model Difusi Teknologi dan Pelatihan Pencetakan Tiga Dimensi Berbahan PLA

Fase	Sintaks Model	Aktivitas Utama	Luaran
1	*Needs and Context Diagnosis*	Mengidentifikasi kebutuhan media pendidikan pangan dan lingkungan, karakteristik anak, serta kapasitas lembaga	Peta kebutuhan media
2	*Material and Environmental Literacy*	Mengkaji sifat PLA, keterbatasan biodegradasi, emisi, serta prinsip pengurangan limbah	Pemahaman material dan batas klaim lingkungan
3	*Pedagogical Media Design*	Menentukan tujuan pembelajaran, karakteristik objek, aktivitas bermain, dan persyaratan perkembangan anak	Spesifikasi rancangan media
4	*Technology Feasibility Decision*	Membandingkan alternatif mencetak, membeli, atau membuat media dari material lain berdasarkan manfaat, biaya, dan risiko	Keputusan teknologi
5	*Role-Based Production Planning*	Menentukan pembagian peran, pengaturan zona, pemeriksaan keselamatan, dan prosedur pengendalian limbah	Rencana produksi terkendali
6	*Expert Review and Reflective Refinement*	Memvalidasi rancangan, mengevaluasi risiko, menelaah kelayakan pedagogis, dan melakukan revisi	Model dan perangkat yang direvisi

Fase pertama mengarahkan guru untuk mengidentifikasi kebutuhan media berdasarkan capaian pembelajaran dan karakteristik lingkungan setempat. Media pendidikan pangan dapat dirancang untuk memperkenalkan bentuk buah, sayuran, tanaman pangan, dan objek yang berkaitan dengan kebiasaan konsumsi sehat, sedangkan media pendidikan lingkungan dapat digunakan untuk memperkenalkan proses pertumbuhan tanaman atau interaksi manusia dengan alam. Namun, kebutuhan tersebut perlu dianalisis terlebih dahulu karena tidak semua objek memerlukan pencetakan tiga dimensi. Benda yang telah tersedia, bahan alam, dan material bekas dapat menjadi alternatif yang lebih sesuai dengan tujuan pendidikan lingkungan.

Fase kedua berorientasi pada pengembangan literasi material. Guru diperkenalkan pada karakteristik PLA sebagai polimer dari sumber daya terbarukan, kondisi pengomposan industri, keterbatasan penguraian di lingkungan alami, dan risiko emisi selama pencetakan. Fase ini memiliki fungsi konseptual yang penting karena mencegah penggunaan media yang bertentangan dengan pesan keberlanjutan. Royer dkk. (2023) menunjukkan bahwa PLA tidak mengalami penguraian berarti selama pengamatan panjang di lingkungan laut, sementara Craplewe dkk. (2023) menegaskan keterbatasan penguraian PLA pada berbagai kondisi akhir penggunaan. Dengan demikian, media berbahan PLA perlu diperkenalkan secara proporsional sebagai benda yang harus dirawat dan digunakan berulang, bukan sebagai material yang dapat dibuang tanpa konsekuensi lingkungan.

Fase ketiga diarahkan pada perancangan media berdasarkan prinsip perkembangan anak. Guru dan perancang mempertimbangkan ukuran, bentuk, tingkat kompleksitas, warna, fungsi, dan kemungkinan interaksi anak dengan media. Rancangan perlu mendukung aktivitas bermain yang terbuka dan memungkinkan anak bereksplorasi dengan tetap memperhatikan keamanan. Yee dkk. (2022) dan Alotaibi (2024) menempatkan aktivitas bermain sebagai bagian penting proses perkembangan, sedangkan Qiu (2024) dan Fan dkk. (2024) menekankan keterkaitan nilai edukatif, keamanan, daya tarik, dan kompleksitas desain dengan karakteristik pengguna. Pada fase ini, desain yang berpotensi menghasilkan komponen kecil, serpihan tajam, atau permukaan yang sulit dibersihkan harus ditolak atau diperbaiki sebelum produksi dipertimbangkan.

Fase keempat merupakan pengambilan keputusan kelayakan teknologi. Model tidak langsung mengarahkan seluruh kebutuhan media pada pencetakan, tetapi mewajibkan perbandingan dengan alternatif pengadaan. Apabila media tersedia dengan harga terjangkau, pembelian dapat menjadi pilihan yang lebih efisien. Apabila media dapat dibuat dari bahan bekas atau bahan alam, alternatif tersebut dapat lebih sesuai dengan tujuan pendidikan lingkungan. Pencetakan diprioritaskan hanya ketika objek memiliki karakteristik khusus yang tidak dapat dipenuhi secara memadai melalui alternatif lain. Dengan demikian, pengambilan keputusan mempertimbangkan manfaat pedagogis sekaligus konsekuensi lingkungan dan ekonomi.

Fase kelima mengatur pembagian tanggung jawab dan alur produksi yang terkendali. Operator bekerja di ruang produksi yang terpisah dari lingkungan anak dengan pengendalian paparan yang sesuai. Penyelesaian media dilakukan secara terpisah, kemudian diikuti pemeriksaan ukuran, permukaan, ketahanan, kebersihan, dan kemungkinan kerusakan. Benda yang tidak memenuhi persyaratan tidak diteruskan ke tahap penggunaan. Model juga menempatkan pencatatan material terbuang sebagai bagian dari pengendalian produksi agar kegagalan pencetakan tidak tersembunyi di balik keberhasilan menghasilkan media baru.

Fase keenam berupa validasi dan penyempurnaan rancangan berdasarkan penilaian ahli PAUD, ahli material, dan ahli keselamatan. Ahli PAUD mengevaluasi relevansi pendidikan dan kesesuaian perkembangan anak, ahli material memeriksa ketepatan informasi dan karakteristik PLA, sedangkan ahli keselamatan menilai sistem pengendalian risiko. Fase ini menghasilkan keputusan revisi yang mempertimbangkan seluruh dimensi penilaian secara bersamaan. Produk dengan kualitas pedagogis tinggi tidak dapat direkomendasikan untuk digunakan apabila masih terdapat persoalan keselamatan yang belum terselesaikan.

3. Hasil Perancangan Pembagian Peran dan Pengaturan Zona

Model difusi teknologi dikembangkan melalui pembagian empat peran yang dibedakan berdasarkan tingkat penguasaan teknis. Peran pengguna difokuskan pada pemilihan dan penggunaan media pembelajaran serta pemeriksaan awal sebelum media diberikan kepada anak. Peran pemilih mencakup kemampuan menentukan desain dari katalog dan menjelaskan spesifikasi yang dibutuhkan. Operator bertanggung jawab atas pelaksanaan pencetakan, penanganan kegagalan, dan penyelesaian produk. Sementara itu, perancang bertanggung jawab mengembangkan model tiga dimensi baru berdasarkan kebutuhan pedagogis dan persyaratan keselamatan. Struktur modul pelatihan untuk setiap peran disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Struktur Modul Pelatihan Berdasarkan Tingkatan Peran

Modul	Sasaran	Kompetensi Utama
Modul A	Seluruh guru	Literasi PLA, pemahaman risiko, pemilihan media, pemeriksaan keamanan, penggunaan pedagogis
Modul B	Guru pemilih desain	Penelusuran katalog, spesifikasi dimensi, penyesuaian desain, komunikasi kebutuhan cetak
Modul C	Operator teknis	Pengoperasian alat, pengendalian emisi, prosedur keselamatan, penyelesaian dan pencatatan limbah
Modul D	Perancang khusus	Pemodelan tiga dimensi, optimasi desain, analisis ketahanan, dan dokumentasi spesifikasi produk

Modul A menjadi komponen wajib karena seluruh guru yang menggunakan media perlu memahami karakteristik material dan batas keselamatan dengan benar, meskipun tidak terlibat dalam pencetakan. Modul B sampai Modul D bersifat bertingkat sesuai kebutuhan peran. Diferensiasi pelatihan ini menjadi strategi untuk mengurangi hambatan adopsi teknologi. Namun, pembagian peran perlu disertai dokumentasi prosedur agar kemampuan produksi tidak bergantung pada satu operator atau perancang.

Pengaturan zona dikembangkan dengan memisahkan ruang produksi, penyelesaian, pemeriksaan, dan penggunaan media. Pemisahan tersebut merupakan konsekuensi dari karakteristik emisi selama pencetakan sebagaimana dilaporkan Azimi dkk. (2016), Zhang dan Black (2023), serta U.S. Environmental Protection Agency (t.t.). Oleh karena itu, kepemilikan mesin oleh setiap lembaga PAUD tidak ditetapkan sebagai syarat penerapan model. Lembaga yang tidak memiliki fasilitas layak dapat menggunakan layanan produksi bersama melalui kerja sama dengan pihak yang memiliki sarana dan tenaga teknis memadai.

Pengembangan kelembagaan semacam ini berkaitan dengan konsep kolaborasi antarpihak yang menempatkan perguruan tinggi, lembaga pendidikan, dan penyedia teknologi sebagai mitra dalam ekosistem inovasi (Etzkowitz & Leydesdorff, 2000; Miller dkk., 2018; González-Martínez dkk., 2023). Meskipun demikian, kelayakan fasilitas bersama harus ditentukan melalui pemeriksaan nyata terhadap prosedur produksi, pengendalian paparan, dan standar keselamatan yang relevan, bukan hanya berdasarkan keberadaan ruang terpisah.

4. Hasil Validasi Ahli

Evaluasi kuantitatif model dilakukan melalui penilaian enam validator yang terdiri atas dua ahli PAUD, dua ahli material, dan dua ahli keselamatan. Setiap kelompok menilai 12 indikator dalam empat dimensi menggunakan skala Likert lima tingkat. Skor maksimum setiap validator adalah 60 dan skor maksimum setiap kelompok adalah 120, sehingga total skor maksimum keseluruhan adalah 360.

a. Hasil Validasi Ahli PAUD

Tabel 6. Hasil Validasi Dua Ahli PAUD

Dimensi Penilaian	P1	P2	Total	Kelayakan
Kesesuaian perkembangan anak	14	15	29	96,67%
Relevansi pedagogis	13	14	27	90,00%
Desain pengalaman bermain	14	13	27	90,00%
Keterterapan model	12	13	25	83,33%
Total	**53**	**55**	**108**	**90,00%**

Keterangan: Skor maksimum masing-masing dimensi adalah 30, sedangkan skor maksimum kelompok adalah 120.

Persentase kelayakan pedagogis dihitung dengan membandingkan skor gabungan dengan skor maksimum.

$$P = (108 / 120) \times 100\% = 90{,}00\%$$

Rerata kualitas sebesar 4,50 pada skala lima menunjukkan kategori sangat layak secara agregat. Dimensi kesesuaian perkembangan anak memperoleh skor tertinggi sebesar 96,67%. Hasil ini menunjukkan bahwa rancangan media dinilai selaras dengan kemampuan eksplorasi, karakteristik perkembangan, dan kebutuhan pengalaman belajar konkret anak usia dini.

Dimensi relevansi pedagogis dan desain pengalaman bermain masing-masing memperoleh 90,00%. Kedua dimensi tersebut menegaskan pentingnya media yang memungkinkan anak mengamati, membandingkan, mengelompokkan, dan mengeksplorasi objek melalui kegiatan bermain. Teknologi pencetakan tidak diperlakukan sebagai tujuan pembelajaran, melainkan sebagai sarana untuk menyediakan objek yang relevan dengan pengalaman anak. Prinsip ini sejalan dengan Danniels dan Pyle (2022) yang menempatkan fasilitasi guru sebagai unsur penting pembelajaran melalui bermain, serta Houston dkk. (2025) yang mengintegrasikan pengamatan, perancangan, pembuatan prototipe, dan evaluasi dalam pengembangan produk pendidikan.

Dimensi keterterapan model memperoleh nilai terendah, yaitu 83,33%. Angka tersebut sedikit berada di bawah target operasional 84% atau rerata 4,20, sehingga kejelasan panduan penggunaan dan pembagian peran perlu disempurnakan. Model yang sesuai secara pedagogis tetap berpotensi sulit diterapkan apabila guru harus memahami prosedur teknis yang terlalu kompleks. Oleh sebab itu, keterterapan menjadi aspek penting dalam menilai keberhasilan rancangan difusi teknologi.

b. Hasil Validasi Ahli Material

Tabel 7. Hasil Validasi Dua Ahli Material

Dimensi Penilaian	M1	M2	Total	Kelayakan
Akurasi karakteristik PLA	14	14	28	93,33%
Validitas klaim keberlanjutan	12	13	25	83,33%
Kualitas material dan produk	13	13	26	86,67%
Pengelolaan limbah	11	11	22	73,33%
Total	**50**	**51**	**101**	**84,17%**

Persentase kelayakan berdasarkan penilaian ahli material diperoleh melalui perhitungan berikut.

$$P = (101 / 120) \times 100\% = 84{,}17\%$$

Rerata kualitas sebesar 4,208 menunjukkan bahwa nilai agregat sedikit melampaui target operasional. Dimensi akurasi karakteristik PLA memperoleh skor tertinggi sebesar 93,33%. Nilai tersebut menunjukkan kesesuaian konseptual antara informasi material, karakteristik termal dan mekanis, serta batas penggunaannya dalam rancangan media.

Namun, dimensi validitas klaim keberlanjutan memperoleh 83,33%, sedangkan pengelolaan limbah hanya mencapai 73,33%. Perbedaan ini menegaskan bahwa pengetahuan mengenai sifat material belum tentu diikuti kemampuan menerapkannya secara bertanggung jawab. Informasi bahwa PLA berasal dari sumber terbarukan belum cukup untuk menyatakan bahwa media yang dihasilkan berdampak rendah terhadap lingkungan. Proses pencetakan membutuhkan energi dan dapat menghasilkan limbah dari kegagalan produksi, material penyangga, dan sisa proses penyelesaian.

Craplewe dkk. (2023) dan Royer dkk. (2023) menunjukkan pentingnya membatasi klaim penguraian PLA pada kondisi yang benar-benar didukung bukti. Oleh karena itu, pembelajaran lingkungan melalui media berbahan PLA harus menghindari pesan bahwa produk dapat dibuang ke tanah atau perairan tanpa dampak. Pengelolaan limbah juga perlu direncanakan sejak tahap desain, bukan setelah produksi menghasilkan material yang tidak terpakai.

Rendahnya nilai pengelolaan limbah menunjukkan perlunya penguatan mekanisme pencatatan bahan terbuang, pencegahan pencetakan yang tidak diperlukan, dan penetapan prosedur penanganan akhir material. Keterbatasan akses terhadap fasilitas pengolahan limbah juga perlu dinyatakan secara terbuka agar rancangan tidak menjanjikan solusi daur ulang yang belum tersedia.

c. Hasil Validasi Ahli Keselamatan

Tabel 8. Hasil Validasi Dua Ahli Keselamatan

Dimensi Penilaian	S1	S2	Total	Kelayakan
Pengendalian paparan	13	13	26	86,67%
Keselamatan fisik media	11	12	23	76,67%
Higiene dan kelayakan penggunaan	12	12	24	80,00%
Manajemen risiko operasional	12	12	24	80,00%
Total	**48**	**49**	**97**	**80,83%**

Persentase kelayakan berdasarkan penilaian ahli keselamatan adalah sebagai berikut.

$$\mathbf{P = (97 / 120) \times 100\% = 80{,}83\%}$$

Rerata kualitas sebesar 4,042 berada di bawah target operasional 4,20. Meskipun rancangan pengendalian paparan memperoleh skor relatif tinggi sebesar 86,67%, aspek keselamatan fisik media masih memerlukan penyempurnaan dengan skor 76,67%.

Dalam konteks pendidikan anak usia dini, keselamatan fisik merupakan aspek yang tidak dapat dikompensasi oleh keunggulan pedagogis. Benda hasil pencetakan berlapis berpotensi memiliki permukaan yang sulit dibersihkan, bagian kecil yang mudah terlepas, atau struktur yang dapat patah menjadi serpihan. Kondisi tersebut menuntut pemeriksaan fisik dan pengujian yang sesuai dengan karakteristik produk dan usia pengguna.

Dimensi higiene dan manajemen risiko operasional masing-masing memperoleh skor 80,00%. Hasil ini menunjukkan perlunya memperjelas prosedur pembersihan, inspeksi kerusakan, penghentian penggunaan media, dan penanganan benda yang tidak memenuhi persyaratan. Skor tersebut tidak dapat dijadikan bukti bahwa media hasil cetak telah aman digunakan anak. Penilaian ahli terhadap rancangan hanya memberikan masukan mengenai kualitas prosedur, sedangkan keputusan keamanan produk fisik tetap memerlukan pemeriksaan dan pengujian yang relevan.

5. Analisis Kuantitatif Multidimensi dan Prioritas Penyempurnaan

Analisis kuantitatif dilakukan untuk membandingkan tingkat kualitas setiap kelompok dan mengidentifikasi dimensi yang memerlukan revisi. Total skor seluruh validator mencapai 306 dari skor maksimum 360 sehingga menghasilkan persentase agregat sebesar 85,00% (Tabel 9).

Tabel 9. Rekapitulasi Hasil Validasi Enam Ahli

Kelompok Ahli	Skor Diperoleh	Skor Maksimum	Rerata 1–5	Persentase
Ahli PAUD	108	120	4,500	90,00%
Ahli material	101	120	4,208	84,17%
Ahli keselamatan	97	120	4,042	80,83%
Gabungan	**306**	**360**	**4,250**	**85,00%**

Meskipun persentase gabungan berada pada kategori sangat layak berdasarkan batas operasional yang ditetapkan, hasil tersebut tidak dapat diartikan bahwa seluruh persyaratan telah terpenuhi. Model difusi teknologi bagi anak usia dini memerlukan aturan evaluasi nonkompensatoris, yaitu kelemahan pada aspek keselamatan atau kejujuran informasi material tidak dapat ditutupi oleh skor tinggi pada dimensi lain.

Analisis kesenjangan kualitas dilakukan dengan membandingkan rerata setiap dimensi terhadap target 4,20. Dimensi keterterapan model PAUD memperoleh rerata 4,167, validitas klaim keberlanjutan 4,167, pengelolaan limbah 3,667, keselamatan fisik media 3,833, serta higiene dan manajemen risiko masing-masing 4,000. Berdasarkan perbandingan tersebut, kesenjangan terbesar terdapat pada pengelolaan limbah sebesar 0,533 poin, disusul keselamatan fisik media sebesar 0,367 poin, serta higiene dan manajemen risiko masing-masing 0,200 poin (Tabel 10).

Tabel 10. Analisis Kesenjangan Kualitas Model

Dimensi	Rerata	Kesenjangan terhadap 4,20	Tindak Lanjut
Keterterapan model PAUD	4,167	0,033	Penyederhanaan panduan
Validitas klaim keberlanjutan	4,167	0,033	Penajaman informasi PLA
Pengelolaan limbah	3,667	0,533	Revisi prosedur limbah
Keselamatan fisik media	3,833	0,367	Revisi desain dan pemeriksaan risiko
Higiene dan penggunaan	4,000	0,200	Perbaikan prosedur pembersihan
Manajemen risiko operasional	4,000	0,200	Penguatan prosedur penghentian dan penanganan masalah

Analisis tersebut menunjukkan bahwa prioritas revisi tidak selalu mengikuti besarnya kontribusi suatu dimensi terhadap skor total. Persyaratan keselamatan tetap menjadi prioritas wajib meskipun kesenjangannya lebih kecil dibandingkan pengelolaan limbah. Dengan demikian, keputusan terhadap model tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan urutan persentase.

Pemeriksaan konsistensi antarvalidator menunjukkan kesamaan skor tepat sebesar 66,67% pada kelompok ahli PAUD, 91,67% pada ahli material, dan 91,67% pada ahli keselamatan. Seluruh pasangan penilaian memiliki selisih tidak lebih dari satu kategori. Temuan ini menunjukkan kedekatan penilaian

antarvalidator, tetapi belum dapat dijadikan bukti reliabilitas yang kuat karena setiap kelompok hanya terdiri atas dua validator dan sebaran skornya terbatas.

Analisis relevansi isi instrumen dapat dilengkapi dengan Aiken's V menggunakan penilaian relevansi yang dikumpulkan terpisah dari penilaian kualitas produk. Dengan dua validator, koefisien ini sangat peka terhadap perbedaan satu skor; sebagai gambaran, pasangan skor relevansi 5 dan 4 menghasilkan V sebesar 0,875. Oleh karena itu, evaluasi instrumen perlu mempertimbangkan nilai individual, ketepatan definisi indikator, dan pertimbangan kualitatif para ahli, bukan hanya nilai koefisien.

6. Pembahasan Kritis Pengembangan Model

Pengembangan model difusi teknologi pencetakan tiga dimensi berbahan PLA menunjukkan bahwa penerapan teknologi dalam pendidikan anak usia dini memerlukan pendekatan yang mengutamakan kesesuaian fungsi dan pengendalian risiko. Model ini menawarkan sudut pandang yang berbeda dari pendekatan adopsi yang menekankan peningkatan kemampuan teknis pengguna. Dalam konteks PAUD, guru memiliki tanggung jawab pedagogis yang kompleks sehingga penguasaan teknologi manufaktur tidak seharusnya menjadi prasyarat untuk memperoleh manfaat media pembelajaran. Penyederhanaan peran melalui pemisahan pengguna, pemilih, operator, dan perancang merupakan strategi untuk mengurangi beban adopsi sekaligus mempertahankan kewenangan guru dalam menentukan kebutuhan media. Temuan bahwa keterterapan model memperoleh nilai terendah pada kelompok ahli PAUD (83,33%) menegaskan bahwa penyederhanaan panduan masih perlu diperkuat.

Dari perspektif pedagogis, pengembangan media konkret memiliki dasar yang kuat dalam pendidikan berbasis pengalaman dan bermain. Namun, penggunaan pencetakan tiga dimensi tetap harus memberikan nilai tambah dibandingkan media yang telah tersedia. Pembuatan objek berbentuk khas lingkungan setempat dapat menjadi pilihan ketika media sejenis sulit diperoleh dari sumber lain. Dalam pembelajaran pangan, bentuk tanaman atau bahan pangan lokal dapat membantu anak mengenali karakteristik visual objek di sekitarnya, sedangkan pembelajaran lingkungan dapat memanfaatkan objek representasional untuk memperkenalkan hubungan antara tumbuhan, manusia, dan lingkungan. Meskipun demikian, media yang dihasilkan tidak boleh menggantikan pengalaman langsung dengan objek alam ketika pengalaman tersebut lebih relevan dengan tujuan pembelajaran.

Kontribusi berikutnya berkaitan dengan kejujuran material sebagai bagian dari desain pendidikan. Ketika lembaga mengajarkan pengurangan limbah menggunakan media plastik yang diproduksi tanpa mempertimbangkan kebutuhan, pesan pembelajaran berpotensi kehilangan konsistensinya. Masalah ini tidak dapat diselesaikan hanya dengan menyampaikan bahwa PLA berasal dari tumbuhan. Guru perlu memahami dan menjelaskan secara tepat hubungan antara sumber bahan, proses produksi, kondisi penguraian, dan tanggung jawab penggunaan kembali. Rendahnya skor pengelolaan limbah (73,33%) memperlihatkan bahwa aspek ini merupakan titik terlemah model dan perlu diperkuat sejak tahap perancangan. Pendidikan lingkungan yang dikembangkan melalui teknologi seharusnya menanamkan kebiasaan mempertimbangkan kebutuhan sebelum menghasilkan benda baru, sejalan dengan gagasan pendidikan lingkungan berbasis pengalaman dan keterhubungan dengan alam (Sunassee & Bokhoree, 2021; Ison & Bramwell-Lalor, 2023; Şeren & Gül, 2022).

Keselamatan merupakan batas paling mendasar dalam pengembangan model. Pencetakan tidak dilakukan di ruang yang digunakan anak, sedangkan benda yang dihasilkan harus melewati pemeriksaan sebelum dipertimbangkan untuk pembelajaran. Pengendalian risiko tidak hanya mencakup emisi selama pencetakan, tetapi juga kemungkinan bahaya tersedak, keretakan, serpihan tajam, dan kesulitan pembersihan. Hasil validasi yang menempatkan keselamatan fisik media pada skor 76,67% menegaskan bahwa kelayakan pedagogis harus berjalan bersama kelayakan keselamatan, bukan menjadi dasar untuk mengabaikannya.

Dari sisi kelembagaan, pengembangan simpul produksi bersama menawarkan alternatif bagi lembaga PAUD yang tidak memiliki fasilitas produksi yang layak. Kerja sama dengan pihak yang memiliki kemampuan teknis memungkinkan guru memanfaatkan media tanpa harus mengoperasikan mesin sendiri. Namun, model tersebut juga membawa risiko ketergantungan pada operator atau perancang tertentu. Avram dkk. (2020) menunjukkan pentingnya kapasitas yang tertinggal pada mitra setelah kolaborasi berakhir, sedangkan Wang dkk. (2023) dan Ten Holter (2022) menempatkan pengaturan partisipasi sebagai faktor yang menentukan apakah kolaborasi benar-benar memberdayakan. Oleh karena itu, keberlanjutan model perlu didukung dokumentasi prosedur, mekanisme pergantian operator, dan pembagian tanggung jawab yang jelas.

Kesenjangan antarlembaga juga menjadi pertimbangan penting. Lembaga dengan fasilitas, tenaga, dan anggaran memadai cenderung lebih mudah memperoleh manfaat teknologi, sedangkan lembaga dengan keterbatasan sumber daya menghadapi hambatan yang lebih besar. Kim dkk. (2026) menunjukkan bahwa akses terhadap teknologi tidak selalu menghasilkan manfaat yang setara. Dalam konteks ini, keberhasilan model difusi tidak seharusnya diukur dari jumlah mesin yang dimiliki lembaga, tetapi dari kemampuan menyediakan media yang relevan dan aman melalui sistem kerja sama yang terjangkau.

Secara metodologis, evaluasi multidimensi memberikan kerangka yang lebih informatif dibandingkan persentase keseluruhan semata. Penilaian enam ahli yang dibagi ke dalam tiga kelompok memungkinkan pemisahan antara kualitas pedagogis, ketepatan material, dan keselamatan. Namun, jumlah dua ahli pada setiap bidang membatasi kekuatan kesimpulan yang dapat ditarik. Selain itu, karena penelitian dibatasi sampai tahap validasi ahli, keberhasilan implementasi pelatihan, peningkatan kompetensi guru, perubahan perilaku anak, dan keamanan produk fisik berdasarkan pengujian standar belum dapat dinyatakan.

Dengan demikian, model difusi teknologi dan pelatihan pencetakan tiga dimensi berbahan PLA berkontribusi pada pengembangan pendekatan adopsi yang lebih selektif, bertanggung jawab, dan kontekstual bagi pendidikan anak usia dini. Kontribusi utamanya terletak pada sintaks enam fase, pembagian peran berbasis kompetensi, pemisahan zona kegiatan, dan mekanisme pengambilan keputusan yang memungkinkan penggunaan teknologi ditolak apabila tidak memberikan manfaat memadai. Hasil validasi menunjukkan bahwa kualitas pedagogis relatif lebih tinggi dibandingkan dimensi keselamatan dan pengelolaan limbah. Perbedaan tersebut menegaskan pentingnya menempatkan keselamatan dan konsistensi pesan lingkungan sebagai persyaratan wajib sebelum model diterapkan secara lebih luas. Pembuktian keamanan produk fisik serta manfaat model bagi guru dan anak menjadi agenda penelitian selanjutnya.

SIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan model difusi teknologi dan pelatihan penerapan pencetakan tiga dimensi berbahan *polylactic acid* (PLA) untuk pendidikan pangan dan lingkungan anak usia dini yang mengintegrasikan ketepatan informasi material, keselamatan penggunaan, dan keterjangkauan adopsi teknologi. Model terdiri atas enam sintaks, yaitu identifikasi kebutuhan dan konteks, penguatan literasi material dan lingkungan, perancangan media pedagogis, pengambilan keputusan kelayakan teknologi, perencanaan produksi berbasis peran, serta validasi dan penyempurnaan reflektif. Model dilengkapi empat tingkatan peran (pengguna, pemilih, operator, dan perancang) dan empat zona kegiatan yang memisahkan proses pencetakan dari lingkungan belajar anak. Hasil validasi menunjukkan persentase kelayakan sebesar 90,00% menurut ahli PAUD, 84,17% menurut ahli material, dan 80,83% menurut ahli keselamatan, dengan kelayakan gabungan 85,00%. Kesenjangan terbesar terhadap target operasional terdapat pada pengelolaan limbah dan keselamatan fisik media, diikuti higiene dan manajemen risiko operasional, sehingga keempat aspek tersebut menjadi prioritas revisi. Penelitian ini menegaskan bahwa penerapan pencetakan tiga dimensi di PAUD harus didasarkan pada kebutuhan pedagogis yang nyata, kapasitas kelembagaan, dan persyaratan keselamatan yang tidak dapat dikompensasi oleh keunggulan teknologi. Karena penelitian dibatasi sampai pengembangan dan validasi ahli, keamanan produk fisik dan efektivitas penggunaan model memerlukan pengujian lanjutan. Model yang dikembangkan memberikan kerangka konseptual dan prosedural bagi pemanfaatan pencetakan tiga dimensi secara selektif, bertanggung jawab, dan selaras dengan tujuan pendidikan pangan dan lingkungan anak usia dini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Negeri Malang atas dukungan pendanaan penelitian ini pada tahun 2026 berdasarkan kontrak nomor 14.04.1855/UN32.14.1/PM/2026. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para validator ahli pendidikan anak usia dini, ahli material, dan ahli keselamatan atas penilaian serta masukan yang diberikan dalam penyempurnaan model.

DAFTAR PUSTAKA

Alotaibi, M. S. (2024). Game-based learning in early childhood education: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Psychology, 15*, 1307881. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1307881

Arifmiboy, A., Iltavia, I., & Iswandi, I. (2024). Full online teacher training service scheme on improving pedagogical and professional competencies. *Nidhomul Haq: Jurnal Manajemen Pendidikan Islam, 9*(1). https://doi.org/10.31538/ndh.v9i1.4542

Avram, G., Ciolfi, L., & Maye, L. (2020). Creating tangible interactions with cultural heritage: Lessons learned from a large scale, long term co-design project. *CoDesign, 16*(3), 251–266. https://doi.org/10.1080/15710882.2019.1596288

Azimi, P., Zhao, D., Pouzet, C., Crain, N. E., & Stephens, B. (2016). Emissions of ultrafine particles and volatile organic compounds from commercially available desktop three-dimensional printers with multiple filaments. *Environmental Science & Technology, 50*(3), 1260–1268. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04983

Craplewe, K., Safder, M., dkk. (2023). Accelerating the biodegradation of poly(lactic acid) through the inclusion of plant fibers: A review of recent advances. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 11*(42), 15146–15170. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c04240

Danniels, E., & Pyle, A. (2022). Inclusive play-based learning: Approaches from enacting kindergarten teachers. *Early Childhood Education Journal, 51*(7), 1169–1179. https://doi.org/10.1007/s10643-022-01369-4

Darmawan, D., Hadiyanti, P., Wibowo, S., Syah, R., & Abdillah, M. F. (2025). Development of digital learning media for community-based education: A collaborative innovation and literacy framework. *Journal of Nonformal Education, 11*(2), 289–300. https://doi.org/10.15294/jone.v11i2.32060

Design-Based Research Collective. (2003). Design-based research: An emerging paradigm for educational inquiry. *Educational Researcher, 32*(1), 5–8. https://doi.org/10.3102/0013189X032001005

Detlor, B., Julien, H., La Rose, T., & Serenko, A. (2022). Community-led digital literacy training: Toward a conceptual framework. *Journal of the Association for Information Science and Technology, 73*(10), 1387–1400. https://doi.org/10.1002/asi.24639

Etzkowitz, H., & Leydesdorff, L. (2000). The dynamics of innovation: From National Systems and "Mode 2" to a Triple Helix of university–industry–government relations. *Research Policy, 29*(2), 109–123. https://doi.org/10.1016/S0048-7333(99)00055-4

Fan, Y., Chong, D. K., & Li, Y. (2024). Beyond play: A comparative study of multi-sensory and traditional toys in child education. *Frontiers in Education, 9*, 1182660. https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1182660

González-Martínez, P., García-Pérez-de-Lema, D., Castillo-Vergara, M., & Hansen, P. B. (2023). Determinants and performance of the quadruple helix model and the mediating role of civil society. *Technology in Society, 75*, 102358. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102358

Houston, N., Manrique, F., Mo, S., Ruoqian, W., Wenjing, J., & Yuting, L. (2025). Designing an effective educational toy: Incorporating design-thinking in the design classroom. *Discover Education, 4*, 11. https://doi.org/10.1007/s44217-025-00402-z

Ison, M., & Bramwell-Lalor, S. (2023). The arts in environmental education: Connecting learners with their talents and nature. *Environmental Education Research, 29*(7), 964–979. https://doi.org/10.1080/13504622.2023.2205062

Istenič, A., Rosanda, V., Volk, M., & Gačnik, M. (2023). Parental perceptions of child's play in the post-digital era: Parents' dilemma with digital formats informing the kindergarten curriculum. *Children, 10*(1), 101. https://doi.org/10.3390/children10010101

Kim, Y., Beland, S. E., & Subramaniam, M. (2026). Crossing the third-level digital divide through digital literacy programs. *Journal of the Association for Information Science and Technology, 77*(2), 397–413. https://doi.org/10.1002/asi.70032

Miller, K., McAdam, R., & McAdam, M. (2018). A systematic literature review of university technology transfer from a quadruple helix perspective: Toward a research agenda. *R&D Management, 48*(1), 7–24. https://doi.org/10.1111/radm.12228

Noya, S., Taneo, S. Y. M., & Melany. (2023). Triple helix innovation ecosystem: The role of small and medium enterprises community in enhancing performance. *Quality Innovation Prosperity, 27*(1), 44–61. https://doi.org/10.12776/qip.v27i1.1759

Qiu, J. (2024). Explore the development and innovative design of children's toys. *Journal of Education, Humanities and Social Sciences, 28*, 227–231. https://doi.org/10.54097/m2z5ns22

Ranakoti, L., Gangil, B., Mishra, S. K., Singh, T., Sharma, S., Ilyas, R. A., & El-Khatib, S. (2022). Critical review on polylactic acid: Properties, structure, processing, biocomposites, and nanocomposites. *Materials, 15*(12), 4312. https://doi.org/10.3390/ma15124312

Royer, S.-J., Greco, F., Kogler, M., & Deheyn, D. D. (2023). Not so biodegradable: Polylactic acid and cellulose/plastic blend textiles lack fast biodegradation in marine waters. *PLoS ONE, 18*(5), e0284681. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284681

Schmalenbach, C., & Ashouri, C. (2025). Design-based research — A framework for participation and action in educational research. *Action Research*. https://doi.org/10.1177/19408447251387997

Şeren, N., & Gül, S. (2022). An innovative and interdisciplinary perspective on environmental issues through ecological art projects: A mixed methods study. *Romanian Review of Geographical Education, 11*(1), 73–91. https://doi.org/10.23741/RRGE120225

Shalihah, R., & Syafryadin, S. (2023). In-service ELT teachers' perception on Learning Management System (LMS) implementation during Teacher Educational Education Program (PPG). *Edu-Ling: Journal of English Education and Linguistics, 6*(2). https://doi.org/10.32663/edu-ling.v6i2.3343

Sunassee, A., & Bokhoree, C. (2021). A designed eco-art and place-based curriculum encouraging students' empathy for the environment. *Ecologies, 2*(3), 248–267. https://doi.org/10.3390/ecologies2030014

Ten Holter, C. (2022). Participatory design: Lessons and directions for responsible research and innovation. *Journal of Responsible Innovation, 9*(2), 275–290. https://doi.org/10.1080/23299460.2022.2041801

U.S. Environmental Protection Agency. (t.t.). *3D printing research at EPA*. https://www.epa.gov/chemical-research/3d-printing-research-epa

Wang, B., Ji, T., & He, R. (2023). Empowerment or disempowerment: The (dis)empowering processes and outcomes of co-designing with rural craftspeople. *Sustainability, 15*(5), 4468. https://doi.org/10.3390/su15054468

Yee, L. J., Radzi, N. M. M., & Mamat, N. (2022). Learning through play in early childhood: A systematic review. *International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development, 11*(4). https://doi.org/10.6007/IJARPED/v11-i4/16076

Zhang, Q., & Black, M. S. (2023). Exposure hazards of particles and volatile organic compounds emitted from material extrusion 3D printing: Consolidation of chamber study data. *Environment International, 182*, 108316. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412023005895