



## **Pembuatan Pola untuk *Sand Casting* menggunakan 3D Printer FDM di SMK Batur Jaya 1 Ceper**

*Pattern Making for Sand Casting using FDM 3D Printer at SMK Batur Jaya 1 Ceper*

**Reza Nurfaizi<sup>1\*</sup>, Arianto Leman Soemowidagdo<sup>2</sup>, Deny Aji Pradana<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup>Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

<sup>3</sup>SMK Batur Jaya 1 Ceper, Indonesia

\*Penulis Koresponden: [rezanurfaizi.2018@student.uny.ac.id](mailto:rezanurfaizi.2018@student.uny.ac.id)

### **Abstrak**

Penelitian ini bertujuan mengembangkan prototipe pola dan mengevaluasi kelayakannya sebagai media pembelajaran praktik pembuatan pola di SMK Batur Jaya 1 Ceper. Penelitian menggunakan metode Research and Development (R&D) dengan model Planning, Production, and Evaluation (PPE). Objek penelitian berupa pola pelat untuk *sand casting* menggunakan 3D printer FDM, sedangkan subjek penelitian meliputi validator akademisi, guru pengampu, dan siswa kelas XI TPL. Data dikumpulkan melalui angket tertutup dan dianalisis secara deskriptif kuantitatif. Hasil penelitian menghasilkan prototipe Pola Pulley yang dicetak menggunakan Elegoo Neptune 4 Plus dengan filamen PLA+ eSUN. Pengukuran dimensi menunjukkan penyimpangan rata-rata sebesar 0,031 mm, lebih kecil daripada *layer height* 0,12 mm, sehingga pola dinyatakan layak digunakan dalam proses pengecoran. Hasil penilaian pengguna memperoleh skor rata-rata 4,83 pada skala 5 dengan kategori sangat layak, sehingga prototipe dapat digunakan sebagai media pembelajaran praktik pembuatan pola *sand casting* di SMK Batur Jaya 1 Ceper.

**Kata kunci:** Media Pembelajaran; Pembuatan Pola; Pendidikan Vokasi; Sand Casting; 3D Printing

### **Abstract**

*This study aimed to develop a pattern prototype and evaluate its feasibility as a learning medium for pattern-making practice at SMK Batur Jaya 1 Ceper. The study employed a Research and Development (R&D) approach using the Planning, Production, and Evaluation (PPE) model. The research object was a plate pattern for sand casting produced using an Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printer, while the research subjects consisted of academic validators, a vocational teacher, and Grade XI students of the Metal Casting Engineering Program. Data were collected using closed-ended questionnaires and analyzed through descriptive quantitative analysis. The study produced a Pulley Pattern prototype printed using an Elegoo Neptune 4 Plus 3D printer with PLA+ eSUN filament. Dimensional measurements showed an average deviation of 0.031 mm, which was lower than the 0.12 mm layer height, indicating that the pattern was suitable for casting applications. User evaluation yielded an average score of 4.83 out of 5, categorizing the prototype as highly feasible for use as a learning medium for sand casting pattern-making practice at SMK Batur Jaya 1 Ceper.*

**Keyword:** 3D Printing; Learning Media; Pattern Making; Sand Casting; Vocational Education

**Diterima:** 24 Juni 2026; **Disetujui:** 27 Juni 2026; **Dipublikasikan:** 30 Juni 2026

## **PENDAHULUAN**

Pendidikan kejuruan pada jenjang Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) berperan penting dalam menyiapkan lulusan yang memiliki kompetensi kerja sesuai dengan kebutuhan Dunia Usaha dan Dunia Industri (DUDI). Proses pembelajaran di SMK tidak hanya menekankan penguasaan konsep, tetapi juga pengembangan keterampilan praktik yang relevan dengan perkembangan teknologi industri. Salah satu program keahlian yang memiliki peran strategis dalam mendukung kebutuhan industri manufaktur

adalah Teknik Pengecoran Logam, terutama di wilayah Ceper yang dikenal sebagai salah satu sentra industri pengecoran logam terbesar di Indonesia. Ketersediaan sumber daya manusia yang kompeten pada bidang tersebut menjadi faktor penting dalam mendukung keberlanjutan industri pengecoran nasional. Oleh karena itu, proses pembelajaran di SMK perlu didukung oleh media dan teknologi yang mampu meningkatkan kompetensi peserta didik sesuai dengan standar industri.

Salah satu kompetensi dasar yang harus dikuasai peserta didik pada Program Keahlian Teknik Pengecoran Logam adalah pembuatan pola (*pattern*) sebagai tahapan awal dalam proses pengecoran. Namun, dalam implementasi pembelajaran di sekolah, proses pembuatan pola masih didominasi oleh metode konvensional menggunakan bahan kayu maupun logam. Metode tersebut membutuhkan waktu yang relatif lama, bahkan mencapai sekitar 70% dari keseluruhan durasi proses produksi, serta memerlukan tingkat keterampilan yang tinggi untuk menghasilkan pola dengan tingkat presisi yang baik (Pal & Ravi, 2007). Kondisi tersebut berpotensi mengurangi efektivitas proses pembelajaran praktik karena peserta didik membutuhkan waktu yang lebih panjang untuk menghasilkan pola yang sesuai spesifikasi. Oleh karena itu, diperlukan inovasi media pembelajaran yang mampu meningkatkan efisiensi proses pembuatan pola tanpa mengurangi kualitas hasil yang diperoleh.

Perkembangan teknologi manufaktur aditif (*additive manufacturing*) memberikan peluang untuk mengatasi permasalahan tersebut melalui pemanfaatan teknologi 3D printing, khususnya metode Fused Deposition Modeling (FDM). Teknologi ini memungkinkan objek fisik dibuat secara bertahap berdasarkan model digital tiga dimensi dengan tingkat akurasi yang tinggi (Wong & Hernandez, 2012). Dalam bidang pengecoran logam, metode FDM telah terbukti mampu menghasilkan pola dengan bentuk geometris yang kompleks, presisi yang baik, serta proses produksi yang lebih efisien dibandingkan metode konvensional (Abdillah & Ulikaryani, 2019). Meskipun demikian, pemanfaatan teknologi tersebut dalam pembelajaran di SMK masih belum optimal. Di SMK Batur Jaya 1 Ceper, perangkat 3D printer FDM telah tersedia, namun penggunaannya masih terbatas sehingga proses praktik pembuatan pola masih mengandalkan metode konvensional dan belum didukung oleh media pembelajaran berbasis hasil cetak 3D yang telah divalidasi.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa pola pengecoran yang diproduksi menggunakan 3D printer layak digunakan dari aspek teknis maupun praktis (Abdillah et al., 2020; Upadhyay et al., 2017). Namun demikian, penelitian-penelitian tersebut lebih berfokus pada aspek manufaktur dan kualitas produk hasil cetak, sehingga belum banyak mengkaji pemanfaatan pola hasil cetak 3D sebagai media pembelajaran dalam pendidikan vokasi, khususnya pada jenjang SMK. Selain itu, masih terbatas penelitian yang mengintegrasikan proses pengembangan produk dengan evaluasi kelayakannya berdasarkan penilaian ahli, guru, dan peserta didik sebagai pengguna media pembelajaran. Kondisi tersebut menunjukkan adanya *research gap*, yaitu belum tersedianya kajian yang mengembangkan media pembelajaran berupa pola *sand casting* berbasis 3D printer FDM sekaligus mengevaluasi kelayakannya dalam konteks pembelajaran praktik di SMK.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, novelty penelitian ini terletak pada pengembangan prototipe pola *sand casting* berbasis 3D printer FDM yang tidak hanya dievaluasi dari aspek dimensi dan kualitas hasil cetak, tetapi juga dari aspek kelayakannya sebagai media pembelajaran melalui penilaian akademisi, guru, dan peserta didik. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menghasilkan produk berupa pola pengecoran, tetapi juga memberikan bukti empiris mengenai potensi pemanfaatannya dalam mendukung proses pembelajaran praktik di SMK. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan prototipe pola *sand casting* berbasis 3D printer FDM serta mengevaluasi kelayakannya sebagai media pembelajaran praktik pembuatan pola di SMK Batur Jaya 1 Ceper. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi alternatif media pembelajaran yang lebih inovatif, efisien, dan relevan dengan perkembangan teknologi manufaktur, sekaligus mendukung peningkatan kualitas pendidikan vokasi yang selaras dengan kebutuhan dunia industri.

## METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) yang bertujuan untuk mengembangkan sekaligus memvalidasi produk berupa pola pengecoran logam berbasis teknologi 3D printing sebagai media pembelajaran praktik pembuatan pola di SMK Batur Jaya 1 Ceper (Sugiyono, 2013). Model pengembangan yang digunakan adalah Planning, Production, and Evaluation (PPE) yang dikemukakan oleh Sugiyono (2019). Model ini dipilih karena memiliki tahapan yang sederhana namun sistematis dalam mengembangkan suatu produk, mulai dari identifikasi kebutuhan, proses pembuatan produk, hingga evaluasi kelayakannya. Penelitian dilaksanakan di SMK Batur Jaya 1 Ceper dengan objek penelitian berupa pola pelat (*plate pattern*) untuk proses *sand casting* yang diproduksi menggunakan Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printer. Subjek penelitian terdiri atas dua dosen ahli dari Universitas Negeri Yogyakarta (UNY) sebagai validator akademisi, dua guru pengampu mata pelajaran Teknik Pengecoran Logam, serta 20 siswa kelas XI Program Keahlian Teknik Pengecoran Logam SMK Batur Jaya 1 Ceper sebagai pengguna media pembelajaran.

Tahap planning diawali dengan analisis kebutuhan melalui studi literatur dan observasi langsung terhadap proses pembelajaran praktik pembuatan pola di SMK Batur Jaya 1 Ceper. Hasil analisis menunjukkan bahwa proses pembuatan pola masih dilakukan secara konvensional sehingga membutuhkan waktu yang relatif lama dan tingkat keterampilan yang tinggi untuk menghasilkan pola dengan dimensi yang presisi. Berdasarkan kebutuhan tersebut, dikembangkan rancangan pola Pulley menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor Professional 2025 sebagai media pembelajaran praktik. Model tiga dimensi yang telah selesai dirancang kemudian diekspor ke dalam format Standard Triangle Language (STL) sebagai format standar yang digunakan pada proses pencetakan menggunakan teknologi manufaktur aditif. Tahap ini menghasilkan model digital yang siap diproses pada tahap produksi.

Tahap production dilakukan dengan mencetak model menggunakan Elegoo Neptune 4 Plus berbasis teknologi Fused Deposition Modeling (FDM) dan material PLA+ eSUN. Proses pencetakan

diatur menggunakan perangkat lunak Elegoo Cura dengan parameter cetak meliputi *layer height* sebesar 0,12 mm, *wall thickness* 0,8 mm, *top/bottom thickness* 0,61 mm, *infill density* 30%, *printing temperature* 205°C, *build plate temperature* 60°C, *material flow* 100%, *print speed* 65 mm/s, *fan speed* 100%, tanpa penggunaan *support*, *initial layer line width* sebesar 120%, serta tanpa mengaktifkan fitur *ironing*. Setelah proses pencetakan selesai, pola dirakit pada pelat dasar kemudian dilakukan proses *finishing* berupa pendempulan dan penghalusan permukaan untuk memperoleh kualitas permukaan yang lebih baik. Pola yang telah selesai selanjutnya digunakan dalam pembuatan cetakan pasir (*sand mold*) dan diaplikasikan pada proses pengecoran menggunakan logam aluminium cair.

Tahap evaluation dilakukan untuk menilai kelayakan produk yang dikembangkan dari aspek teknis maupun aspek pengguna. Evaluasi aspek teknis dilakukan melalui pengukuran dimensi pola hasil cetak dan dimensi produk hasil pengecoran aluminium untuk mengetahui tingkat penyimpangan dimensi terhadap model digital serta menghitung besarnya penyusutan (*shrinkage*) yang terjadi selama proses pengecoran. Sementara itu, evaluasi aspek pengguna dilakukan menggunakan instrumen berupa angket tertutup yang diberikan kepada validator akademisi, guru pengampu, dan siswa sebagai pengguna media pembelajaran. Instrumen penilaian disusun menggunakan skala Likert lima tingkat, mulai dari kategori Sangat Kurang hingga Sangat Baik. Data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif kuantitatif dengan menghitung skor rata-rata setiap aspek penilaian, kemudian diinterpretasikan berdasarkan kategori kelayakan untuk menentukan tingkat kelayakan pola hasil cetak sebagai media pembelajaran praktik pembuatan pola *sand casting*.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Pengembangan Produk

Penelitian ini berhasil mengembangkan sebuah prototipe media pembelajaran berupa pola pelat (*plate pattern*) untuk proses *sand casting* pada komponen *pulley* menggunakan teknologi Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing. Produk dikembangkan melalui tahapan perancangan model tiga dimensi, proses pencetakan menggunakan printer Elegoo Neptune 4 Plus, hingga proses *finishing* berupa pendempulan dan penghalusan permukaan sebelum digunakan pada proses pengecoran logam. Seluruh tahapan pengembangan dapat diselesaikan dalam waktu yang relatif lebih singkat dibandingkan metode pembuatan pola secara konvensional yang memerlukan proses pemotongan, pembentukan, dan penyelesaian secara manual. Kondisi ini menunjukkan bahwa teknologi manufaktur aditif memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi proses pembuatan media praktik sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap keterampilan manual yang tinggi.

Produk yang dihasilkan memiliki kualitas permukaan yang baik serta mampu merepresentasikan bentuk geometris sesuai dengan model digital yang dirancang. Penggunaan material PLA+ menghasilkan pola yang cukup kuat untuk digunakan sebagai media praktik pengecoran pasir (*sand casting*) sekaligus memberikan kualitas visual yang baik sehingga memudahkan peserta didik dalam memahami bentuk pola pengecoran. Temuan ini menunjukkan bahwa teknologi 3D printing tidak hanya

berfungsi sebagai media produksi, tetapi juga sebagai media pembelajaran yang mampu mengintegrasikan konsep desain digital dengan praktik manufaktur secara langsung. Hasil tersebut sejalan dengan Wong dan Hernandez (2012) yang menjelaskan bahwa teknologi manufaktur aditif mampu menghasilkan objek tiga dimensi secara akurat berdasarkan model digital sehingga banyak dimanfaatkan dalam bidang pendidikan maupun industri.

### Analisis Kelayakan Teknis

Kelayakan teknis produk dievaluasi melalui pengukuran dimensi pola hasil cetak dan membandingkannya dengan dimensi pada model digital. Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui tingkat penyimpangan dimensi (*dimensional deviation*) yang terjadi selama proses pencetakan sehingga dapat diketahui tingkat akurasi pola yang dihasilkan. Hasil pengukuran dimensi pola cetak disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Ringkasan Hasil Pengukuran Dimensi Pola Cetak 3D

| Bagian Pola | Dimensi Desain (mm) | Rata-Rata Hasil Ukur (mm) | Penyimpangan (mm) |
|-------------|---------------------|---------------------------|-------------------|
| Bagian A    | 54 & 52             | 53,883 & 51,997           | -0,117 & -0,003   |
| Bagian B    | 84 & 82             | 83,857 & 81,943           | -0,143 & -0,057   |
| Bagian C    | 40 & 5              | 40,090 & 5,093            | +0,090 & +0,093   |
| Bagian D    | 22 & 22             | 22,013 & 22,187           | +0,013 & +0,187   |

Berdasarkan Tabel 1, rata-rata penyimpangan dimensi pola hasil cetak sebesar 0,088 mm. Nilai tersebut menunjukkan bahwa seluruh dimensi pola masih sangat mendekati ukuran desain digital, dengan penyimpangan terbesar terjadi pada Bagian D sebesar 0,187 mm, sedangkan penyimpangan terkecil terjadi pada salah satu dimensi Bagian A sebesar 0,003 mm. Secara keseluruhan, nilai penyimpangan tersebut masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk media praktik pengecoran logam di lingkungan pendidikan.

Rata-rata penyimpangan sebesar 0,088 mm juga lebih kecil dibandingkan parameter layer height yang digunakan pada proses pencetakan, yaitu 0,12 mm. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses pencetakan berlangsung secara konsisten sehingga mampu menghasilkan geometri yang sesuai dengan model digital. Menurut Gibson et al. (2021), ketelitian dimensi yang berada di bawah tinggi lapisan (*layer height*) menunjukkan kualitas pencetakan yang baik pada teknologi Fused Deposition Modeling. Oleh karena itu, pola yang dikembangkan dinilai layak digunakan sebagai media pembelajaran praktik maupun sebagai pola untuk proses pengecoran logam.

Selain mengevaluasi pola hasil cetak, penelitian ini juga menganalisis dimensi produk hasil pengecoran aluminium yang menggunakan pola tersebut. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa produk cor mengalami penyusutan (*shrinkage*) rata-rata sebesar 1,125%. Nilai tersebut masih berada dalam kisaran penyusutan paduan aluminium yang dilaporkan dapat mencapai sekitar 6% (Kannan & Balasubramanian, 2015). Temuan ini mengindikasikan bahwa pola hasil cetak tidak hanya memiliki ketelitian dimensi yang baik, tetapi juga mampu menghasilkan produk cor dengan penyimpangan yang

masih sesuai karakteristik material. Dengan demikian, pola berbasis 3D printing layak digunakan sebagai media pembelajaran sekaligus media praktik pengecoran di SMK.

### Analisis Respons Pengguna

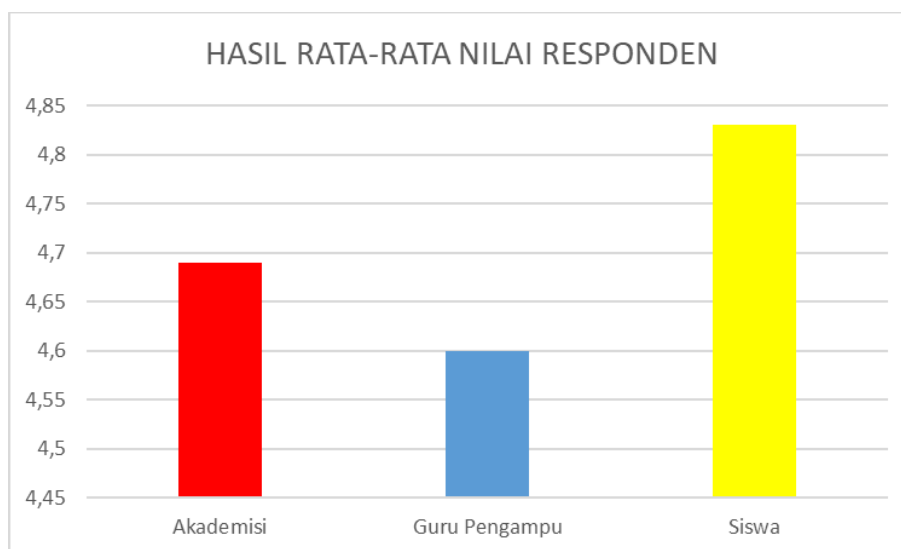
Evaluasi kelayakan media pembelajaran juga dilakukan melalui penilaian pengguna yang terdiri atas validator akademisi, guru pengampu, dan peserta didik. Hasil penilaian dari masing-masing kelompok responden disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rata-rata Skor Kelayakan Media Pembelajaran

| Kelompok Validator | Jumlah Responden | Rerata Skor (Skala 5) | Kategori     |
|--------------------|------------------|-----------------------|--------------|
| Akademisi          | 2                | 4,69                  | Sangat Layak |
| Guru Pengampu      | 2                | 4,6                   | Sangat Layak |
| Siswa              | 20               | 4,83                  | Sangat Layak |

Berdasarkan Tabel 2, seluruh kelompok responden memberikan penilaian pada kategori Sangat Layak. Validator akademisi memberikan skor rata-rata 4,69, guru pengampu 4,60, sedangkan peserta didik memberikan skor rata-rata tertinggi yaitu 4,83. Hasil tersebut menunjukkan bahwa media pembelajaran yang dikembangkan telah memenuhi aspek kelayakan dari sisi akademik maupun pengguna.

Distribusi rata-rata skor setiap kelompok responden dapat diamati secara lebih jelas pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil Rata-Rata Nilai Responden

Berdasarkan Gambar 1, validator akademisi memberikan skor tertinggi pada aspek indikator keberhasilan dengan nilai rata-rata 4,75. Nilai tersebut menunjukkan bahwa media pembelajaran dinilai mampu memenuhi tujuan pengembangan secara substansial. Temuan ini selaras dengan penelitian Sutopo dan Wahyudi (2019) yang menyatakan bahwa media pembelajaran berbasis prototipe digital mampu meningkatkan kejelasan bentuk dan fungsi sehingga memperkuat validitas isi dalam pembelajaran teknik.

Guru pengampu memberikan penilaian tertinggi pada aspek manfaat, yaitu sebesar 4,67. Hasil tersebut menunjukkan bahwa media pembelajaran berbasis 3D printing mempermudah guru dalam menjelaskan konsep pembuatan pola pengecoran yang sebelumnya sulit divisualisasikan menggunakan metode konvensional. Temuan ini didukung oleh Utomo et al. (2021) yang menjelaskan bahwa media hasil cetak tiga dimensi mampu meningkatkan efektivitas penyampaian materi praktik karena peserta didik dapat mengamati bentuk objek secara nyata. Di sisi lain, Ramadhan dan Hidayat (2020) mengemukakan bahwa efektivitas media cetak 3D sangat dipengaruhi oleh kualitas desain digital dan parameter pencetakan. Pada penelitian ini, penggunaan parameter pencetakan yang optimal, seperti *layer height* 0,12 mm dan *infill density* 30%, menghasilkan media dengan detail geometris yang baik sehingga mendukung efektivitas pembelajaran.

Respons peserta didik menunjukkan hasil yang sangat positif dengan skor tertinggi pada aspek manfaat dan hasil, masing-masing sebesar 4,95. Penilaian tersebut menunjukkan bahwa media pembelajaran mudah digunakan, menarik, dan membantu peserta didik memahami proses pembuatan pola serta pengecoran logam secara lebih konkret. Temuan ini sejalan dengan Permana et al. (2018) yang menyatakan bahwa media pembelajaran berbasis objek nyata mampu meningkatkan keterlibatan belajar, pemahaman konseptual, serta retensi kognitif peserta didik, terutama pada pembelajaran teknik yang bersifat praktik.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memperkuat temuan Abdillah et al. (2020) bahwa pola hasil cetak 3D printing memiliki tingkat akurasi geometris yang lebih baik dibandingkan pola konvensional berbahan kayu. Selain aspek teknis tersebut, penelitian ini juga menunjukkan bahwa media berbasis 3D printing memperoleh tingkat penerimaan yang sangat baik dari pengguna sehingga berpotensi mendukung proses pembelajaran praktik secara lebih efektif. Hasil ini juga mendukung pendapat Zhou dan Yin (2019) bahwa penerapan teknologi manufaktur aditif dalam lingkungan pendidikan mampu mempercepat proses desain–produksi–evaluasi sekaligus mendorong berkembangnya kemampuan *design thinking* dan *problem solving* peserta didik.

Integrasi teknologi 3D printing dalam pembelajaran praktik juga sejalan dengan kebutuhan pengembangan kompetensi abad ke-21 dan transformasi pendidikan vokasi menuju Industri 4.0. Melalui pemanfaatan media ini, peserta didik tidak hanya mempelajari proses pengecoran logam, tetapi juga memperoleh pengalaman menggunakan perangkat lunak Computer-Aided Design (CAD), teknologi digital fabrication, dan proses manufaktur aditif yang saat ini banyak diterapkan di industri. Kondisi tersebut mendukung pendapat Lee et al. (2022) yang menyatakan bahwa penguasaan kompetensi digital menjadi salah satu kemampuan penting yang dibutuhkan lulusan pendidikan vokasi untuk meningkatkan daya saing di dunia kerja. Oleh karena itu, keberhasilan pengembangan media pembelajaran ini tidak hanya ditunjukkan oleh aspek kelayakan teknis dan respons pengguna yang sangat baik, tetapi juga oleh relevansinya terhadap kebutuhan industri dan arah pengembangan pendidikan vokasi di Indonesia.

## SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa pengembangan pola *pulley* untuk proses *sand casting* menggunakan teknologi Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing dengan material PLA+ berhasil dilaksanakan melalui pendekatan Research and Development (R&D) menggunakan model Planning, Production, and Evaluation (PPE). Produk yang dihasilkan memiliki kelayakan teknis yang baik dengan penyimpangan dimensi rata-rata sebesar 0,088 mm, lebih kecil daripada *layer height* sebesar 0,12 mm, serta menghasilkan penyusutan rata-rata produk cor aluminium sebesar 1,125%, yang masih berada dalam batas toleransi material. Selain itu, hasil validasi oleh akademisi, guru pengampu, dan siswa menunjukkan bahwa media pembelajaran memperoleh kategori sangat layak, dengan skor tertinggi diberikan oleh siswa pada aspek manfaat dan hasil. Temuan tersebut menunjukkan bahwa pola berbasis 3D printing tidak hanya memenuhi aspek akurasi dan kualitas teknis, tetapi juga efektif sebagai media pembelajaran praktik pembuatan pola *sand casting*, sehingga berpotensi meningkatkan kualitas pembelajaran vokasi yang lebih relevan dengan perkembangan teknologi manufaktur modern.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena proses validasi hanya dilakukan pada satu sekolah dan menggunakan satu jenis material cetak, yaitu PLA+, sehingga hasil penelitian belum dapat digeneralisasikan pada berbagai kondisi pembelajaran maupun variasi material lainnya. Selain itu, penelitian ini belum mengevaluasi ketahanan pola terhadap penggunaan berulang maupun pengaruh kondisi operasional yang lebih kompleks sebagaimana dijumpai pada proses pengecoran skala industri. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas cakupan responden dari berbagai satuan pendidikan, membandingkan penggunaan material cetak lain seperti ABS, PETG, atau resin, serta menguji ketahanan mekanis dan termal pola hasil cetak. Berdasarkan temuan penelitian ini, sekolah juga direkomendasikan untuk mengintegrasikan teknologi 3D printing ke dalam pembelajaran praktik Teknik Pengecoran Logam sebagai media pembelajaran inovatif yang mampu meningkatkan efisiensi proses pembuatan pola, memperkuat kompetensi peserta didik, dan mendukung implementasi pembelajaran yang selaras dengan kebutuhan industri manufaktur modern.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, R., et al. (2020). *Penerapan Teknologi 3D Printing dalam Pembuatan Pola untuk Pengecoran Logam*. Jurnal Teknologi dan Pendidikan, 5(2), 115-123.
- Sutopo, A., & Wahyudi, E. (2019). *Validitas Media Pembelajaran Teknik dengan Prototipe Digital*. Jurnal Pendidikan Vokasi, 9(3), 301-310.
- Utomo, E. P., et al. (2021). *Pemanfaatan Media 3D Printing dalam Pembelajaran Teknik Manufaktur di Sekolah Menengah Kejuruan*. Jurnal Teknologi Pendidikan, 13(1), 44-52.
- Ramadhan, A. F., & Hidayat, M. (2020). *Evaluasi Desain Digital Terhadap Kualitas Produk 3D Printing dalam Pembelajaran Praktik*. Jurnal Inovasi Pendidikan Teknik Mesin, 9(1), 18-26.
- Permana, Y., et al. (2018). *Efektivitas Media Nyata dalam Pembelajaran Teknik di SMK*. Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan, 25(1), 65-74.
- Zhou, Y., & Yin, S. (2019). *3D Printing in STEM Education: A Review of Impact and Challenges*. International Journal of Engineering Education, 35(5), 1234-1242.
- Lee, J., Park, H., & Kim, M. (2022). *Developing 21st Century Skills through Additive Manufacturing in Technical Education*. Journal of Vocational Education Research, 45(2), 67-84.
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2021). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* (3rd ed.). Springer.

- Kannan, T., & Balasubramanian, K. (2015). Effect of solid shrinkage on casting simulation of aluminum alloys. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4(5), 899-902.
- Pal, P., & Ravi, B. (2007). An integrated product and process design approach for rapid tooling. *Rapid Prototyping Journal*, 13(3), 162-171. <https://doi.org/10.1108/13552540710750859>
- Sugiyono. (2013). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Alfabeta.
- Sugiyono. (2019). *Metode Penelitian dan Pengembangan (Research and Development/R&D)*. Alfabeta.
- Surdia, T., & Chijjiwa, K. (2006). *Teknik Pengecoran Logam*. Pradnya Paramita.
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 20 Tahun 2003 tentang Sistem Pendidikan Nasional.
- Upadhyay, T., Sivarupan, T., & El Mansori, M. (2017). 3D printing for rapid sand casting—A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 29, 211-220. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.07.014>
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 1–10. <https://doi.org/10.5402/2012/208760>