



IMPLEMENTASI 3D PRINTING DALAM PEMBELAJARAN TEKNIK DI SMK YPK GAJAH MADA PALEMBANG

AMIR ARIFIN^{1*}, M.A.ADE SAPUTRA¹, IRSYADI YANI¹, AKBAR TEGUH PRAKOSO¹, GUNAWAN¹, HASAN BASRI¹, MUHAMMAD ZAHIR¹, ISMAIL THAMRIN¹, ASTUTI¹

Jurusan Teknik Mesin, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia

*Corresponding author: amir@unsri.ac.id

(Received: 10 September 2025; Accepted: 11 November 2025; Published on-line: 1 Desember 2025)

ABSTRAK: Perkembangan teknologi pada era Revolusi Industri 4.0 menuntut lulusan Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) memiliki kompetensi di bidang manufaktur berbasis digital, salah satunya teknologi 3D *printing* tipe *fused deposition modeling* (FDM). Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini bertujuan meningkatkan pemahaman dan keterampilan guru SMK YPK Gajah Mada Palembang dalam merancang dan mengoperasikan mesin cetak 3D serta memanfaatkannya sebagai media pembelajaran teknik. Metode yang digunakan diawali dengan survei kebutuhan dan wawancara untuk memetakan pengetahuan awal dan kesiapan guru terhadap teknologi 3D *printing*, dilanjutkan dengan pelatihan terstruktur yang mencakup pengenalan perangkat lunak CAD, proses *slicing* menggunakan Ultimaker Cura, pengaturan parameter pencetakan, hingga praktik langsung mencetak produk sederhana seperti komponen transmisi dan gantungan kunci. Evaluasi dilakukan melalui kuesioner dan wawancara setelah pelatihan. Hasil kegiatan menunjukkan bahwa peserta memperoleh pemahaman yang baik terhadap alur kerja 3D *printing*, merasa cara penyampaian dan isi materi mudah diikuti, serta 70% guru menyatakan akan mencoba menerapkan 3D *printing* sebagai media pembelajaran di kelas. Selain itu, penyerahan satu unit mesin cetak 3D kepada sekolah mendukung keberlanjutan implementasi teknologi ini. Secara keseluruhan, program pelatihan efektif dalam memperkuat kompetensi guru dan mendorong integrasi teknologi manufaktur aditif dalam pembelajaran teknik di SMK.

KEYWORDS: *Manufaktur aditif, 3D printing, Fused Desposition Modelling, Pembelajaran Teknik SMK, Pelatihan Guru*

1. PENDAHULUAN

Dalam era revolusi industri 4.0, perkembangan teknologi menjadi faktor utama yang mendorong kemajuan industri di Indonesia, termasuk bidang manufaktur dan desain produk. Teknologi berbasis digital seperti *Internet of Things* (IoT), *Artificial Intelligence* (AI), sensor, robotika, dan salah satunya teknologi fabrikasi aditif atau 3D *printing* [1], telah menjadi pilar utama dalam mendukung daya saing industri nasional [2]. Indonesia semakin berupaya mengintegrasikan teknologi ini ke berbagai lini, termasuk di sektor pendidikan, khususnya di tingkat Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) [3]. Salah satu teknologi yang berpotensi besar untuk membentuk kompetensi tenaga kerja masa depan adalah 3D *Printing* tipe FDM (*fused deposition modelling*), yang mampu mencetak objek tiga dimensi secara akurat dan efisien. Selain itu, pentingnya pendidikan dalam bidang sains, teknologi, rekayasa, dan matematika (STEM) memainkan peran sentral dalam dunia pendidikan.

Teknologi pencetakan 3D dalam pendidikan sekolah sangat erat kaitannya dengan penguatan pendidikan [4]. Dalam bidang sains, misalnya, teknologi ini memungkinkan pemahaman terhadap sistem, interaksi, dan/atau struktur yang kompleks (misalnya, dalam biologi sel [5], ekologi [6], kimia: [7]; dalam matematika, misalnya, pengembangan

kemampuan visualisasi spasial [8]; dalam teknik, teknologi ini mendukung keterampilan praktis dalam proses penciptaan [9]; dan dalam pendidikan teknik, misalnya, keterlibatan dengan isu keberlanjutan dan pencetakan 3D.

Pendidikan STEM mendorong inovasi, berpikir kritis, dan keterampilan pemecahan masalah yang penting untuk daya saing siswa di masa depan. Teknologi 3D *printing* merupakan sumber daya pengajaran yang berharga dalam pendidikan STEM. Pencetakan 3D memungkinkan pembuatan model digital secara lapis demi lapis, serta meningkatkan kemampuan siswa dalam memecahkan masalah, berkolaborasi, berkomunikasi, dan berpikir kritis. Teknologi ini mendukung transisi dari metode pembelajaran tradisional ke pengalaman belajar 3D yang lebih dinamis [10].

Penguasaan kompetensi dalam teknologi 3D *printing* menjadi sangat penting agar lulusan SMK mampu bersaing di dunia industri. Oleh karena itu, peningkatan pemahaman dan keterampilan guru sebagai ujung tombak pendidikan di SMK sangat diperlukan. Melalui kegiatan pelatihan dan sosialisasi mengenai mesin 3D *printing*, khususnya FDM, diharapkan guru-guru di SMK Palembang dapat memahami cara mengoperasikan 3D *printing*, serta mengintegrasikan teknologi ini dalam proses pembelajaran dan pengembangan produk inovatif di sekolah [11]. Penerapan 3D *printing* yang efektif dalam bidang pendidikan memang memerlukan pelatihan yang memadai bagi guru, karena banyak guru yang mungkin belum memiliki keterampilan dan kepercayaan diri yang cukup untuk mengadopsi teknologi ini secara optimal ke dalam kurikulum sekolah [12], [13].

Kegiatan pengabdian masyarakat (PKM) juga bertujuan memberikan pemahaman awal kepada guru-guru SMK mengenai potensi teknologi 3D *printing* dalam dunia pendidikan, serta mendukung integrasi aspek pedagogis, psikologis, dan didaktis dalam pengembangan kurikulum. Melalui pemberian pelatihan dan sosialisasi tentang teknologi manufaktur aditif di SMK Palembang, diharapkan dapat memperkuat ekosistem pendidikan vokasi dan industri kreatif nasional. Dengan meningkatkan kompetensi guru dan memanfaatkan teknologi 3D *printing*, SMK mampu menghasilkan lulusan yang tidak hanya siap menghadapi tantangan industri modern, tetapi juga berperan aktif dalam memajukan inovasi dan daya saing bangsa

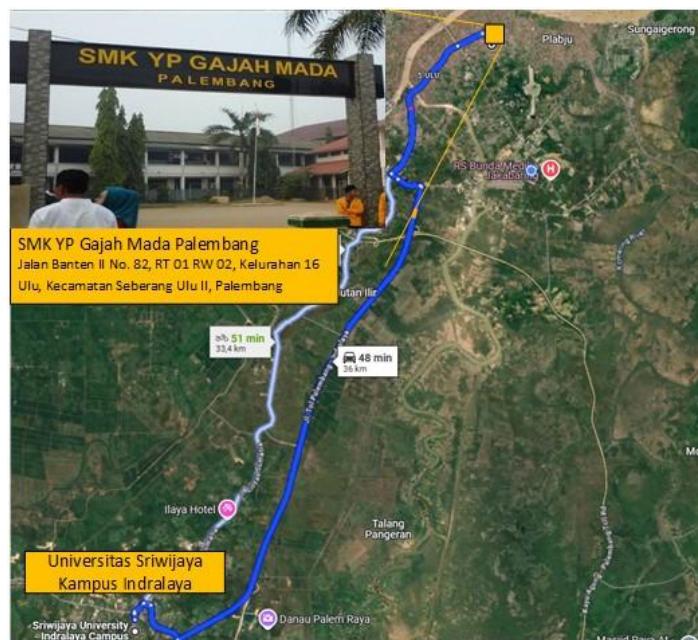
2. METODELOGI PELAKSANAAN

Pada tahap awal kegiatan pengabdian ini, dibentuk tim pelaksana yang terdiri dari dosen dan mahasiswa dari Jurusan Teknik Mesin dan Jurusan Sosiologi Universitas Sriwijaya, dengan latar belakang keahlian yang beragam seperti desain, perancangan elemen mesin, manufaktur serta bidang sosiologi pendidikan. Setelah tim terbentuk, dilakukan diskusi untuk merumuskan tujuan utama kegiatan, seperti terlihat pada alur kerja kegiatan Gambar 1.



Gambar 1. Alur kerja kegiatan pengabdian kepada masyarakat.

Setelah tim dan tujuan kegiatan diperoleh, selanjutnya menentukan lokasi mitra atau identifikasi *stakeholder* untuk dilaksanakannya kegiatan PKM. Dimana akan dilakukan analisis kebutuhan dengan dilakukan survei terhadap para guru terhadap kegiatan pendampingan yang akan kami laksanakan. Seluruh hasil responden akan dievaluasi dan dilakukan pemetaan kebutuhan, dilakukan penentuan prioritas berdasarkan urgensi, cakupan, dan dampaknya. Maka dari itu, dipilihlah topik sosialisasi dan pelatihan penggunaan mesin cetak 3D tipe FDM sebagai faktor kunci untuk mengatasi kendala utama yang telah diidentifikasi.



Gambar 2. Lokasi mitra

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini dilaksanakan di SMK YPK Gajah Mada Palembang sebagai mitra berdasarkan hasil identifikasi kebutuhan dan tingkat kesiapan guru dalam penerapan teknologi mesin cetak 3D. Lokasi sekolah berjarak 34 KM dari Universitas Sriwijaya yang dapat dilihat pada Gambar 2.

Identifikasi dilakukan melalui wawancara langsung dan survei kebutuhan yang melibatkan guru-guru dari berbagai SMK, termasuk pemberian kuesioner untuk mengetahui sejauh mana pemahaman dan kesiapan mereka dalam mengimplementasikan teknologi cetak 3D dalam proses pembelajaran maupun pengembangan produk. SMK YPK Gajah Mada Palembang dipilih karena sekolah ini memiliki jurusan-jurusan yang sangat relevan, yaitu Teknik Pemesinan, Teknik Kendaraan Ringan Otomotif, serta Teknik dan Bisnis Sepeda Motor, yang secara langsung bersinggungan dengan potensi pemanfaatan teknologi cetak 3D. Jurusan-jurusan tersebut memiliki karakteristik praktik yang tinggi, sehingga penggunaan 3D *printing* sangat potensial untuk menunjang pembelajaran berbasis proyek. Oleh karena itu, kegiatan pengabdian ini diharapkan mampu meningkatkan kompetensi guru dan memperkuat integrasi teknologi manufaktur aditif dalam kurikulum pembelajaran di SMK tersebut. Survei dan kuesioner ini dilaksanakan sebelum pelaksanaan kegiatan sebagai dasar analisis kebutuhan nyata di lapangan, dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1.

Hasil kuesioner menunjukkan bahwa guru SMK YPK Gajah Mada Palembang memiliki pandangan positif terhadap teknologi 3D *printing* dalam pembelajaran. Sebagian besar guru meyakini bahwa teknologi ini dapat meningkatkan kualitas pengajaran dan daya saing siswa di

era industri 4.0. Namun, mereka juga menyadari keterbatasan kemampuan dalam mengoperasikan mesin 3D dan menilai fasilitas yang tersedia di sekolah belum memadai.

Tabel 1: Hasil survei kepada Guru SMK YPK Palembang sebelum diadakan kegiatan pengabdian

No	Pertanyaan	Sangat setuju	Setuju	Netral	Tidak setuju
A1	Saya yakin teknologi mesin cetak 3D dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas pengajaran di SMK	90%	10%	0%	0%
A2	Saya merasa bahwa saya perlu mengikuti pelatihan tentang penggunaan mesin cetak 3D agar mampu mengaplikasikan teknologi ini di sekolah.	80%	20%	0%	0%
A3	Berdasarkan pengamatan, sebagian besar guru di SMK belum memiliki pengetahuan yang cukup tentang teknologi mesin cetak 3D.	80%	20%	0%	0%
A4	Menurut saya, fasilitas mesin cetak 3D di sekolah saya saat ini belum memadai untuk digunakan dalam kegiatan belajar mengajar.	90%	10%	0%	0%
A5	Saya percaya bahwa teknologi cetak 3D penting untuk meningkatkan daya saing siswa di era industri 4.0.	80%	20%	0%	0%
A6	Saya merasa bahwa penerapan teknologi cetak 3D di sekolah membutuhkan pelatihan dan pendampingan dari pihak luar.	90%	10%	0%	0%
A7	Saya merasa bahwa diri saya belum cukup mampu untuk mengoperasikan mesin cetak 3D secara mandiri.	80%	20%	0%	0%
A8	Saya sangat mendukung adanya kegiatan pelatihan dan sosialisasi teknologi mesin cetak 3D di sekolah saya.	100%	0%	0%	0%



Gambar 3. Materi pelatihan PKM

Implementasi kegiatan dilakukan dengan memberikan materi pelatihan dan demonstrasi penggunaan mesin cetak 3D kepada para guru di SMK YPK Gajah Mada Palembang. Materi pelatihan disusun berdasarkan kebutuhan peserta dan disampaikan secara sistematis, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Setelah sesi pelatihan, peserta didampingi dalam menyelesaikan contoh praktis yang berkaitan dengan pengoperasian mesin cetak 3D. Evaluasi kegiatan dilakukan melalui metode kuesioner dan wawancara untuk mengetahui tingkat pemahaman peserta, kendala yang dihadapi selama pelatihan, serta harapan terhadap keberlanjutan kegiatan ini. Hasil evaluasi digunakan sebagai dasar pemetaan kebutuhan dan penentuan sasaran baru, sehingga dapat dirumuskan solusi dan tindak lanjut pada kegiatan pengabdian berikutnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi teknologi 3D printing secara bertahap mulai diterapkan dalam dunia pendidikan sebagai bagian dari inovasi pembelajaran berbasis teknologi. Persepsi para pendidik terhadap penggunaan teknologi 3D *printing* sebagai alat bantu dalam proses pembelajaran dan pengajaran juga mulai diteliti di sekolah-sekolah di Jerman [11]. Hasilnya, Guru yang telah menggunakan *printing* 3D dalam pembelajaran cenderung memiliki pandangan yang lebih luas, terutama dalam hal pengembangan kompetensi siswa.

Kegiatan pengabdian ini bertujuan untuk memberikan wawasan awal mengenai persepsi guru terhadap teknologi pencetakan 3D di bidang pendidikan Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) di Indonesia. Fokus utamanya adalah pada pandangan mereka terkait potensi teknologi ini dan upaya mengintegrasikan aspek pedagogis, psikologis, serta didaktis dalam pengembangan kurikulum dan proses belajar mengajar di kelas.



Gambar 4. Kata sambutan kegiatan PKM di SMK YPK Gajah Mada Palembang oleh (A) Ketua pelaksana; (B) Kepala Sekolah

Kegiatan PKM ini dilaksanakan oleh dosen dan mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada hari Rabu, 26 Oktober 2024, di SMK YPK Gajah Mada Palembang, melalui pelaksanaan sosialisasi dan pelatihan dasar penggunaan mesin cetak 3D untuk mendukung peningkatan kompetensi guru. Pelatihan dimulai dengan sambutan pembukaan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4, dan dilanjutkan dengan demonstrasi langsung penggunaan mesin cetak 3D.



Gambar 5. Penjelasan materi pelatihan 3D *printing*

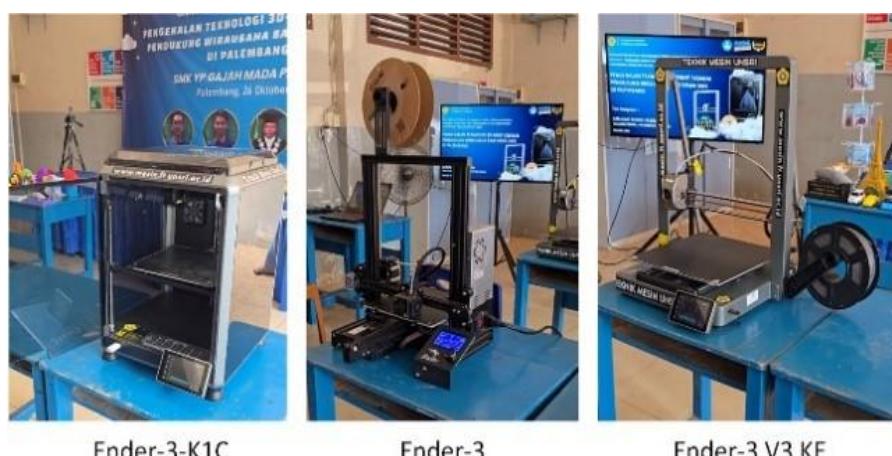
Pada Gambar 5 adalah penjelasan materi, dimana ada sebanyak 10 guru berpartisipasi dalam kegiatan ini. Pelatihan dimulai dengan pengenalan perangkat lunak desain berbasis CAD seperti AutoCAD, SolidWorks, Fusion 360, dan SketchUp. Bagi peserta pemula, juga dikenalkan platform seperti Thingiverse untuk mengakses model siap cetak. Proses pembelajaran dilanjutkan dengan *slicing* model menggunakan Ultimaker Cura 4.1.0, konversi ke format G-code, dan praktik langsung mencetak objek menggunakan *printing* 3D tipe FDM. Proses *slicing* merupakan tahapan konversi dari dokumen *.stl menjadi dokumen G-code yang dapat dibaca oleh mesin cetak 3D. Dalam proses ini, pengguna dapat mengatur berbagai parameter seperti ketebalan lapisan, kecepatan pencetakan, suhu nozel, serta pengaturan tambahan lain yang tersedia.



Gambar 6. Alur proses dari 3D model hingga proses *printing*

Proses *slicing* menggunakan perangkat lunak Ultimaker Cura 4.1.0, seperti pada Gambar 6. Pada contoh praktik pencetakan objek transmisi roda gigi, pengaturan yang digunakan meliputi ketebalan lapisan 0,1 mm, ukuran nozel 0,2 mm, suhu nozel 220°C, dan kecepatan pencetakan 30 mm/s. Untuk meningkatkan kualitas hasil cetak dan mencegah kontaminasi dengan permukaan *print bed*, digunakan fitur *raft* sebagai lapisan dasar. Selain itu, konfigurasi pencetakan juga disesuaikan agar mesin dapat mencetak lima buah roda gigi secara bersamaan, sehingga proses pendinginan menjadi lebih merata.

Setelah proses *slicing* selesai, file dieksport ke dalam format *.gcode dan disimpan ke dalam kartu SD. Kartu SD tersebut kemudian dimasukkan ke dalam soket mesin cetak 3D untuk memulai proses pencetakan. Dalam sesi praktik ini, peserta berhasil mencetak objek 3D dalam waktu sekitar 30 menit.



Gambar 7. 3D *printing* tipe FDM (*fused deposited modelling*) dengan proses cetak objek 3D secara *offline printing*.

Pada pelatihan ini kita menggunakan 3 buah mesin 3D *printing* seperti pada Gambar 7, hal ini bertujuan agar setiap peserta dapat mempraktikkan secara paralel sehingga dapat tidak butuh pergantian dan dapat belajar lebih optimal.



Gambar 8. Suasana pelatihan 3D *printing*

Pada Gambar 8, terlihat antusiasme para peserta dimana peserta merasa optimis terhadap pembelajaran ini karena diyakini lebih aplikatif dan jika diterapkan dalam proses belajar mengajar di kelas, maka suasana pembelajaran akan lebih hidup dan lebih menarik perhatian siswa sehingga mesin cetak 3D nantinya merupakan mata pelajaran yang lebih diminati anak didik. Sebagian kecil peserta merasa ragu untuk menerapkannya di kelas dengan alasan sarana dan prasarana sekolah yang kurang memadai, misalnya mesin cetak 3D itu sendiri.



Gambar 9. Hasil desain dan cetak dari peserta pelatihan menggunakan 3D *printing*

Adapun pada Gambar 9 merupakan hasil desain dan cetak dari para peserta. Kemudian setelah beberapa rangkaian acara di atas terlaksanakan, maka akan memasuki sesi akhir dari sosialisasi ini yaitu pemberian kenang kenangan berupa 3D *printing* kepada SMK YPK Gajah

Mada Palembang yang dapat dilihat pada Gambar 10 di bawah ini.



Gambar 10. Pemberian kenang kenangan 3D *printing* dari Universitas Sriwijaya kepada Sekolah SMK YPK Gajah Mada Palembang

Respons dan tanggapan terhadap kegiatan dilakukan melalui sesi diskusi bersama para peserta yang merupakan guru SMK YPK Gajah Mada Palembang. Indikator pencapaian tujuan dan tolok ukur keberhasilan kegiatan ini ditentukan berdasarkan banyaknya interaksi tanya jawab, masukan dari peserta, serta hasil pengisian kuesioner.

Kuesioner disusun berdasarkan tiga pertanyaan utama yang merepresentasikan efektivitas pelaksanaan kegiatan. Pertama, sebanyak 80% peserta menyatakan cukup mudah memahami cara pemateri menyampaikan materi sosialisasi, sementara 20% menyatakan sangat mudah memahaminya. Kedua, 60% peserta menyatakan cukup mudah memahami isi materi sosialisasi dan pelatihan, dan 40% menyatakan sangat mudah memahami isi materi yang disampaikan. Ketiga, seluruh peserta (100%) menyatakan setuju untuk mendukung keberlanjutan kegiatan sosialisasi penggunaan mesin cetak 3D, serta memberikan kritik dan saran yang membangun. Secara keseluruhan, peserta menunjukkan partisipasi aktif dan memberikan respons yang sangat positif terhadap kegiatan ini. Evaluasi lanjutan melalui wawancara menunjukkan bahwa para guru menganggap pengoperasian mesin cetak 3D relatif mudah karena prosedurnya mirip dengan pengoperasian mesin CNC—dimulai dari pembuatan model CAD, kemudian diubah menjadi G-code, dan dilanjutkan dengan proses fabrikasi. Berdasarkan hasil evaluasi, sebanyak 70% dari 20 guru peserta menyatakan akan mencoba menerapkan media pembelajaran berbasis mesin cetak 3D di kelas masing-masing sebagai bagian dari peningkatan kualitas proses belajar mengajar.

Berdasarkan pandangan perspektif peneliti dibidang 3D *printing*, integrasi teknologi 3D *printing* ke dalam konsep pengajaran memerlukan kompetensi pada guru dan siswa, khususnya dalam bidang pemodelan 3D dan keterampilan pemecahan masalah, kreativitas, serta pengetahuan tentang proses manufaktur dan bahan-bahan untuk pencetakan 3D [13]. Guru-guru yang menggunakan teknologi pencetakan 3D di kelas mereka juga menyebutkan bahwa pemodelan 3D merupakan kompetensi penting yang dipelajari siswa saat terlibat dalam proyek-proyek 3D, yang diikuti dengan pengembangan kemampuan berpikir kreatif dan keterampilan pemecahan masalah, serta keterampilan teknologi [14].

Berdasarkan berbagai kompetensi yang terlibat, penggunaan aktif teknologi pencetakan 3D oleh siswa menuntut penerapan keterampilan yang tinggi untuk menjalankan proses

berpikir kreatif dan konstruksi—mulai dari sebuah ide atau permasalahan, melalui pemodelan solusi, hingga pencetakan objek 3D. Dengan kompleksitas teknologi ini, pembelajaran berbasis kurikulum mata pelajaran sebagai hasil dari proses perancangan/pembuatan atau dalam penggunaan objek 3D tidak menjadi terabaikan. Sebaliknya, keterkaitan berbasis teknologi antara sains, teknologi, rekayasa, dan matematika (STEM) memungkinkan kegiatan mengajar dan belajar dengan pencetakan 3D berlangsung dalam konteks pembelajaran yang multidisipliner, kontekstual, dan spesifik terhadap mata pelajaran [15].



Gambar 11. Foto bersama penutupan kegiatan pelatihan

Selain imajinasi spasial, dan keterampilan teknis, kemudian siswa juga dituntut untuk mampu memecahkan masalah yang berkaitan dengan proses berpikir kreatif [16], [17]. Adapun pembelajaran yang mandiri dan terstruktur (self-regulated learning) juga turut berkembang melalui implementasi proyek pencetakan 3D. Pengembangan ini umumnya disertai oleh pendekatan pengajaran yang konstruktivis, berbasis praktik langsung (hands-on), serta reflektif secara kritis dan kontekstual [15]. Oleh karena itu, pencetakan 3D memiliki potensi besar baik dari sudut pandang metodologis maupun didaktis, dan penting untuk memperoleh pemahaman yang cukup akurat mengenai keyakinan guru dalam kedua aspek tersebut.

Tingginya persentase guru yang menyatakan kesediaan untuk menerapkan teknologi 3D printing dalam pembelajaran menunjukkan bahwa pelatihan ini memiliki tingkat penerimaan yang baik di lingkungan SMK. Hal ini mengindikasikan bahwa teknologi manufaktur aditif dipandang relevan dan aplikatif untuk mendukung pembelajaran teknik berbasis proyek. Namun demikian, keraguan sebagian kecil peserta terkait keterbatasan sarana dan prasarana menunjukkan bahwa faktor infrastruktur masih menjadi tantangan utama dalam adopsi teknologi ini di sekolah kejuruan. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menegaskan bahwa keberhasilan implementasi 3D printing dalam pendidikan tidak hanya ditentukan oleh kompetensi guru, tetapi juga oleh dukungan fasilitas, kebijakan sekolah, dan integrasi ke dalam kurikulum pembelajaran vokasi. Oleh karena itu, keberlanjutan program serupa perlu didukung melalui penyediaan fasilitas yang memadai serta perencanaan integrasi teknologi 3D printing secara sistematis dalam kurikulum SMK.

4. KESIMPULAN

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat yang berfokus pada pelatihan teknologi 3D printing bagi guru SMK YPK Gajah Mada Palembang berhasil meningkatkan pemahaman dan



keterampilan peserta dalam mengoperasikan mesin cetak 3D tipe FDM serta menggunakan perangkat lunak pendukung seperti CAD dan *slicing software*. Pelatihan yang mencakup teori hingga praktik menghasilkan peningkatan kemampuan guru dalam merancang dan memproduksi objek 3D sederhana sebagai media pembelajaran. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa peserta mampu mengikuti materi dengan baik, merasakan kemudahan dalam proses pelatihan, dan memiliki antusiasme tinggi terhadap pemanfaatan teknologi manufaktur aditif dalam pembelajaran teknik. Sebanyak 70% guru menyatakan kesediaan untuk mulai menerapkan mesin cetak 3D di kelas masing-masing. Pemberian satu unit mesin cetak 3D kepada sekolah turut mendukung keberlanjutan penggunaan teknologi ini. Secara keseluruhan, program ini efektif dalam memperkuat kompetensi guru serta mendorong integrasi teknologi 3D *printing* pada kurikulum pembelajaran vokasi, sehingga dapat meningkatkan kualitas pendidikan teknik dan kesiapan siswa menghadapi kebutuhan industri modern. Ke depan, dukungan fasilitas yang berkelanjutan serta integrasi teknologi 3D printing ke dalam kurikulum pembelajaran vokasi menjadi faktor kunci untuk memaksimalkan dampak pelatihan terhadap peningkatan kompetensi guru dan kesiapan siswa menghadapi kebutuhan industri 4.0.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Sachdeva, R. Agrawal, C. Chaudhary, D. Siddhpuria, D. Kashyap, and S. Timung, “Sustainability of 3D printing in industry 4.0: A brief review,” in *3D Printing Technology for Water Treatment Applications*, 2022. doi: 10.1016/B978-0-323-99861-1.00010-2.
- [2] B. L. Rezqianita and R. Ardi, “Drivers and Barriers of Industry 4.0 Adoption in Indonesian Manufacturing Industry,” in *ACM International Conference Proceeding Series*, 2020. doi: 10.1145/3400934.3400958.
- [3] F. F. Ramdhani and B. Mulyanti, “Additive manufacturing in education,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/830/4/042093.
- [4] S. Ford and T. Minshall, “Invited review article: Where and how 3D printing is used in teaching and education,” *Additive Manufacturing*. 2019. doi: 10.1016/j.addma.2018.10.028.
- [5] J. R. Bagley and A. J. Galpin, “Three-dimensional printing of human skeletal muscle cells: An interdisciplinary approach for studying biological systems,” *Biochem. Mol. Biol. Educ.*, 2015, doi: 10.1002/bmb.20891.
- [6] H. Kwon, “Effects of 3D printing and design software on students’ overall performance,” *J. STEM Educ.*, 2017.
- [7] J. Pernaa and S. Wiedmer, “A systematic review of 3D printing in chemistry education - Analysis of earlier research and educational use through technological pedagogical content knowledge framework,” *Chemistry Teacher International*. 2020. doi: 10.1515/cti-2019-0005.
- [8] L. Medina Herrera, J. Castro Pérez, and S. Juárez Ordóñez, “Developing spatial mathematical skills through 3D tools: augmented reality, virtual environments and 3D printing,” *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, 2019, doi: 10.1007/s12008-019-00595-2.
- [9] J. Chen and L. Cheng, “The influence of 3D printing on the education of primary and secondary school students,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1976/1/012072.
- [10] Y. Sun and Q. Li, “The application of 3D printing in STEM education,” in *Proceedings of 4th IEEE International Conference on Applied System Innovation 2018, ICASI 2018*, 2018. doi: 10.1109/ICASI.2018.8394476.
- [11] C. Thyssen and M. Meier, “3D Printing as an element of teaching—perceptions and perspectives of teachers at German schools,” *Front. Educ.*, 2023, doi: 10.3389/feduc.2023.1233337.
- [12] H. Choi and J. M. Kim, “Implications for activating 3D printer use for education in elementary and secondary schools,” *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, 2018, doi: 10.18517/ijaseit.8.4-2.5722.
- [13] D. Assante, G. M. Cennamo, and L. Placidi, “3D printing in education: An european perspective,” in *IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON*, 2020. doi: 10.1109/EDUCON45650.2020.9125311.
- [14] T. Trust and R. W. Maloy, “Why 3D Print? The 21st-Century Skills Students Develop While

- Engaging in 3D Printing Projects,” *Comput. Sch.*, 2017, doi: 10.1080/07380569.2017.1384684.
- [15] H. A. Pearson and A. K. Dubé, “3D printing as an educational technology: theoretical perspectives, learning outcomes, and recommendations for practice,” *Educ. Inf. Technol.*, 2022, doi: 10.1007/s10639-021-10733-7.
- [16] Y. H. Chien and P. Y. Chu, “The Different Learning Outcomes of High School and College Students on a 3D-Printing STEAM Engineering Design Curriculum,” *Int. J. Sci. Math. Educ.*, 2018, doi: 10.1007/s10763-017-9832-4.
- [17] A. Bicer, S. B. Nite, R. M. Capraro, L. R. Barroso, M. M. Capraro, and Y. Lee, “Moving from STEM to STEAM: The effects of informal STEM learning on students’ creativity and problem solving skills with 3D printing,” in *Proceedings - Frontiers in Education Conference, FIE*, 2017. doi: 10.1109/FIE.2017.8190545.