

Potensi dan Kendala Penerapan Teknologi 3D printing dalam Penyediaan Hunian Layak dan Terjangkau di Indonesia

Ratu Sonya Mentari Haerdy ^{1*}, Indah Fazrin Nurzannah ²

^{1,2} Program Studi Arsitektur, Fakultas Arsitektur dan Desain,
Institut Teknologi Nasional Bandung

Email: ratusonja@itenas.ac.id

ABSTRAK

Perkembangan teknologi dan metode membangun dalam arsitektur terus berkembang hingga saat ini. Hal tersebut merupakan tantangan bagi seorang perancang untuk selalu berinovasi dengan memanfaatkan teknologi tersebut. Teknologi fabrikasi digital secara 3D printing sudah dimanfaatkan oleh beberapa negara di dunia dalam memproduksi hunian dalam waktu singkat dengan biaya yang efisien. Pemenuhan kebutuhan perumahan masyarakat hingga saat ini masih menjadi prioritas pemerintah, sehingga diharapkan dengan adanya inovasi dan metode membangun cepat yang lebih mutakhir dapat dijadikan sebagai alternatif solusi atas permasalahan yang dihadapi. Oleh karena itu, kajian mengenai teknologi fabrikasi menjadi urgensi saat ini untuk menggali berbagai potensi jika diterapkan di Indonesia, khususnya dalam lingkup penyediaan rumah layak dan terjangkau berbasis pada teknologi fabrikasi digital. Hasil dari berbagai kajian literatur menunjukkan bahwa teknologi 3D printing dalam produksi hunian di Indonesia masih memiliki sejumlah kendala diantaranya adalah kapasitas sumber daya manusia, ketersediaan material dan alat, dan keterbatasan penelitian mengenai aplikasi nyata teknologi 3D printing di Indonesia dan dunia.

Kata kunci: 3D printing, fabrikasi digital, hunian terjangkau

ABSTRACT

The development of technology and construction methods in the field of architecture is still growing today. Always innovating by using technology is a challenge for a designer. 3D printing digital fabrication technology has been used by several countries in the world to produce housing in a short time at an efficient cost. The fulfillment of the housing needs of the community has been a priority. The existence of digital fabrication methods can be used as an alternative solution in order to face the problems. Therefore, the study of fabrication technology is urgent at this time to explore the various potentials when applied in Indonesia, especially in the scope of the provision of decent and affordable housing on the basis of digital fabrication technology. The results of various literature reviews show that the 3D printing technology in housing production in Indonesia still has a number of obstacles, including the capacity of human resources, the availability of materials and tools, and the limited research on the real application of 3D printing technology in Indonesia and the world.

Keywords: 3D printing, digital fabrication, housing affordability

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi saat ini telah memberikan sejumlah keuntungan dalam dunia arsitektur, termasuk perkembangan dalam hal teknologi konstruksi. Produk arsitektur dapat diproduksi secara cepat dengan biaya yang lebih murah. Lebih jauh lagi, teknologi pada masa kini dapat menghasilkan bangunan yang lebih ramah terhadap lingkungan. Kontribusi dari perkembangan teknologi tersebut terletak pada metode membangun arsitektur, salah satunya adalah metode fabrikasi digital menggunakan *3D printing*.

3D printing merupakan metode fabrikasi digital produk arsitektur yang dipengaruhi oleh konsep otomatisasi dalam membangun. Beberapa penelitian menyebutkan bahwa metode membangun menggunakan *3D printing* dapat mengurangi jejak karbon (*carbon footprint*) dan mengurangi biaya dalam konstruksi bangunan. Konsep dari *3D printing* sudah banyak dimanfaatkan dalam memproduksi objek-objek yang berukuran kecil seperti. Hal tersebut sebenarnya bukan hal yang baru dalam kehidupan manusia, karena *3D printing* sudah ditemukan sejak tahun 1980 [1]. Kini, teknologi tersebut sudah dikembangkan agar dapat memproduksi bangunan dalam skala 1:1, dan merupakan hal yang baru dalam dunia arsitektur.

Teknologi tersebut belum pernah diterapkan pada proses pembangunan di Indonesia, namun beberapa negara berkembang di dunia sudah mulai menerapkannya dalam rangka pemenuhan hunian layak dan terjangkau. Negara Indonesia yang termasuk ke dalam kategori negara berkembang perlu mempersiapkan diri dalam menyambut perkembangan tersebut, karena metode digital fabrikasi sangat mungkin untuk diterapkan di Indonesia. Oleh karena itu, kajian ini akan mengulas seputar potensi dan kendala aplikasi fabrikasi digital *3D printing* dan hal-hal yang harus dipersiapkan, sehingga kapasitas sumber daya manusia khususnya arsitek di Indonesia dapat terus mengikuti perkembangan jaman dan siap menerima tantangan revolusi industri 4.0.

2. KAJIAN LITERATUR

2.1 *3D printing* dalam Arsitektur

Teknologi *3D printing* merupakan teknologi manufaktur yang dapat menghasilkan objek nyata dengan proses pembuatan lapisan demi lapisan konstruksi hingga menghasilkan objek 3 dimensi secara utuh. Proses pembuatan objek tersebut dapat dilakukan menggunakan alat 3d printer yang ukurannya sangat bervariasi sesuai dengan kegunaannya. Alat tersebut terintegrasi dengan aplikasi pemodelan 3d pada komputer, layaknya kita mencetak dokumen tulisan yang sudah kita buat pada komputer, namun kali ini produk yang dihasilkan adalah objek secara 3D.

Proses pembuatan objek 3D dibuat menggunakan pipa yang mengeluarkan material polimer dan membentuk lapisan demi lapisan hingga menghasilkan objek secara utuh. Dalam konteks arsitektur, perkembangan *3D printing* dalam menghasilkan produk bangunan berpotensi sangat besar, dengan merubah material produksi menggunakan material konstruksi dan mesin printer yang lebih besar. Teknologi percetakan secara 3 dimensi diprediksikan akan menjadi peralatan yang penting dalam proses desain dan konstruksi. Teknologi tersebut memberikan dampak positif terhadap waktu produksi, biaya, keselamatan pekerja, dan memperluas segmentasi pasar.

Perkembangan metode dalam konstruksi bangunan mengikuti revolusi dari industri. Dalam penelitian sebelumnya, disebutkan bahwa pada masa pra revolusi industri, bangunan arsitektur memiliki ciri khas dan orisinalitas arsitek sangat terlihat, namun proses konstruksi yang sangat lama. Berbeda dengan masa revolusi industri, proses konstruksi arsitektur sangat cepat, namun kehilangan keunikan pada desain karena produksinya yang bersifat massal [2]. Jika dibandingkan dengan kondisi perkembangan dari revolusi industri saat ini, teknologi *3D printing* dapat menjadi jembatan antara kebutuhan bangunan yang memiliki ciri khas, unik, desain fleksibel, namun proses produksi dapat lebih cepat dan murah.

2.2 Proses Pencetakan Konstruksi Secara Digital

Pada tahun 2004, Dr. Behrokh Khoshnevis dari Universitas South Carolina melakukan eksperimen dengan membuat dinding menggunakan teknologi *3D printing* untuk pertamakalinya [1]. Mesin pencetakan yang digunakan adalah robot yang dapat mengeluarkan sejenis pasta yang terbuat dari beton yang dikeluarkan seperti pasta gigi dan diletakkan berlapis lapis (Gambar 1). Beton tersebut bukanlah material beton pada umumnya, karena beton konvensional membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mengering hingga kembali siap untuk menahan campuran beton basah di atasnya. Oleh karena itu, jenis beton yang digunakan harus dicampurkan dengan bahan aditif yang membuat beton lebih cepat mengeras, dan agregat kasar pun tidak digunakan dalam campuran beton ini. Dinding bangunan yang dibuat tidak menggunakan bata, melainkan hanya premix beton dengan ketebalan dinding sekitar 24 cm.



Gambar 1. Proses Pencetakan Produk Arsitektur menggunakan 3D Printer
Sumber: Shakir, 2019




Untuk membuat objek 3D, dibutuhkan perangkat komputer dengan software pemodelan 3D. Setelah pemodelan digital telah selesai dibuat, maka langkah selanjutnya adalah membagi objek model tersebut menjadi beberapa lapisan secara horizontal. Lapisan-lapisan tersebut yang kemudian dibangun dari lapisan yang paling bawah hingga mencapai lapisan paling atas. Metode tersebut membutuhkan proses pembangunan yang lebih cepat dibandingkan proses membangun secara konvensional yang membutuhkan waktu berbulan-bulan. Gambar berikut ini merupakan salah satu contoh pembangunan hunian dengan menerapkan digital fabrikasi (Gambar 2).



Gambar 2. Pembangunan Rumah Tinggal di China menggunakan Teknologi *3D printing*
Sumber: Shakir, 2019

Sebuah perusahaan di China mengumumkan bahwa mereka dapat membangun 10 rumah dalam waktu kurang dari 24 jam (Gambar 2) [1]. Sistem konstruksi seperti ini pun sudah diterapkan pada beberapa negara di dunia. Berikut ini merupakan studi kasus beberapa negara yang sudah menerapkan metode *3D printing* pada proses pembangunan.

Tabel 1. Contoh kasus aplikasi fabrikasi digital metode 3D printing dari berbagai negara

No.	Nama Proyek	Uraian	Sumber
1	WinSun Company Buildings (2014) 	Tahun Pembuatan: 2014 Perusahaan: WinSun Negara: Cina Luas Bangunan: 20m ² Biaya: US\$ 4.800 Waktu yang dibutuhkan: 24 jam	[3][4]
2	Low Income House by ICON – Latin America (2018) 	Tahun Pembuatan: 2018 Perusahaan: ICON Negara: Amerika Luas Bangunan: - Biaya: US\$ 10.000 Waktu yang dibutuhkan: <24 jam	[4]
3	Small House by Apis Cor – Rusia (2016) 	Tahun Pembuatan: 2016 Perusahaan: Apis Cor Negara: Rusia Luas Bangunan: 29.85m ² Biaya: US\$ 10.134 Waktu yang dibutuhkan: 24 jam	[4] [5]

Sumber: Kajian Literatur

2.3 Aplikasi Teknologi Fabrikasi 3D printing Berdasarkan Tipe Bangunan

2.3.1 Penyediaan Hunian Pasca Bencana

Banyak keluarga yang kehilangan rumahnya karena hancur akibat bencana. Dalam tahap rehabilitasi bencana penyediaan rumah permanen secara konvensional sangatlah tidak memungkinkan, karena membutuhkan banyak sumberdaya manusia dalam proses konstruksi, sementara waktu yang dibutuhkan sangat mendesak. Metode membangun secara cepat menggunakan prinsip contour crafting dengan mesin pencetak 3D sangat memungkinkan dalam memproduksi hunian permanen dengan waktu kurang dari 24 jam untuk menghasilkan hunian seluas 2000 ft² yang lengkap dengan utilitas kelistrikan dan plambing. Metode fabrikasi tersebut pun mengurangi limbah konstruksi pada lokasi, serta membutuhkan jumlah pekerja yang tidak banyak.

2.3.2 Penyediaan Hunian Masyarakat Berpenghasilan Rendah

Permasalahan permukiman kumuh pada negara berkembang menjadi isu strategis yang selalu dihadapi oleh pemerintah. Dalam rangka menurunkan perkembangan permukiman kumuh di perkotaan, maka contour crafting dengan mesin pencetak 3D dapat dimanfaatkan untuk menyediakan hunian yang layak namun dengan biaya yang lebih murah. Hal ini banyak diteliti di beberapa negara yang memiliki permasalahan serupa seperti Afrika Selatan, Sudan, dan India.

2.3.3 Potensi dan Tantangan Aplikasi Teknologi Fabrikasi 3D printing

Metode 3D printing pada proses konstruksi bangunan merupakan hal yang masih sangat baru, sehingga masih sedikit negara-negara yang sudah mulai memanfaatkan metode dan teknologi tersebut dalam proses konstruksi bangunan. Berdasarkan beberapa literatur, beberapa penelitian dari negara yang sudah mengaplikasikan teknologi tersebut telah memberikan ulasannya dan diklasifikasikan menjadi potensi dan tantangan dari metode 3D printing. Berikut ini (tabel 2) merupakan rincian dari potensi dan tantangan tersebut.

Tabel 2. Potensi dan Tantangan Aplikasi Fabrikasi Digital metode 3D printing

	Uraian	Sumber
Potensi	<ol style="list-style-type: none"> 1. Penggunaan material konstruksi lebih efisien dan <i>zero waste</i> 2. Waktu proses konstruksi lebih singkat 3. Kualitas bangunan lebih baik karena tingkat presisi robot lebih tinggi 4. Produktifitas meningkat 5. Desain lebih organic dan unik 6. Mengurangi tingkat kecelakaan kerja 7. Menghasilkan lapangan pekerjaan baru 8. Kepuasan pengguna 9. Tidak memerlukan Gudang bahan 10. Biaya material lebih efisien 11. Biaya distribusi material lebih efisien 12. Biaya konstruksi lebih efisien karena mengurangi penggunaan perancah (<i>scaffolding</i>) 	<p>[1] [3][4][5][6] [7][8]</p>
Kendala	<ol style="list-style-type: none"> 1. Terbatasnya sumberdaya manusia yang mumpuni teknologi BIM 2. Terbatasnya SDM yang menguasai metode 3D printing 3. Investasi yang tinggi pada peralatan 3D printing 4. Terbatasnya riset mengenai implementasi 3D printing pada dunia nyata 5. Regulasi standar bangunan belum memuat metode 3D printing, masih menggunakan metode manual 6. Kurangnya dukungan dari regulasi pemerintah dalam penerapan 3D printing 7. Terbatasnya ahli 3D printing 8. Kurangnya diseminasi akan manfaat 3D printing dalam penyediaan perumahan berkelanjutan di masa depan 9. Alat pencetak (<i>printer</i>) membutuhkan energi listrik 100x lipat lebih besar dibandingkan dengan metode konvensional 10. Kesulitan penyimpanan alat karena ukurannya yang sangat besar 11. Keterbatasan jumlah material yang dapat digunakan dalam 3D printing 12. Belum teruji secara laboratorium tahan terhadap gaya seismic gempa 13. Menambah jumlah pengangguran (pekerja konvensional) 	<p>[1][5][6][7][8] [9]</p>

Sumber: Kajian Literatur

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Potensi penerapan metode fabrikasi digital 3D printing di Indonesia

Pemenuhan Perumahan Layak dan Terjangkau di Perkotaan - Sebanyak 55% populasi masyarakat di Indonesia lebih memilih untuk tinggal di perkotaan karena kelengkapan infrastruktur yang tersedia [10](BPS, 2018). Peningkatan penduduk di perkotaan menimbulkan sejumlah dampak terhadap meningkatnya permintaan rumah tinggal. Fakta yang terjadi saat ini menunjukkan bahwa peningkatan

permintaan perumahan di Indonesia tidak diiringi oleh penyediaan rumah yang layak di perkotaan. Hal tersebut dapat ditinjau dari hasil statistic persentase rumah tangga yang memiliki akses terhadap hunian yang layak dan terjangkau terus menurun (dari tahun 2018 (98,55%) sampai dengan 2019 (61,09%), dan mengalami peningkatan yang tidak signifikan pada tahun 2020 (63,24%) [11].

Sejak tahun 2019, pemerintah menetapkan kriteria rumah hunian yang layak jika memenuhi 4 kriteria, meliputi kecukupan luas tempat tinggal minimum 7,2 m²/orang, memiliki akses terhadap air minum layak, memiliki akses terhadap sanitasi layak, dan ketahanan bangunan (*durable housing*), yaitu atap terluas berupa beton/ genteng/ seng/ kayu/ sirap; dinding terluas berupa tembok/ plesteran anyaman bambu/kawat, kayu/papan dan batang kayu; dan lantai terluas berupa marmer/ granit/ keramik/ parket/vinil/karpet/ ubin/tegel/teraso/ kayu/papan/ semen/bata merah. Jika dibandingkan dengan teknologi *3D printing*, semua komponen secara arsitektural dari bangunan layak huni dapat terpenuhi dalam waktu yang singkat serta pembangunan hunian secara massal agar biaya lebih efisien.

Komponen dinding dari beton saat ini sudah dapat digunakan sebagai alternative material dinding seperti pengaplikasian dinding pre-fabrikasi. Hal yang berbeda adalah campuran digunakan pada campuran beton *3D printing* yang tidak menggunakan tulangan pada beton. Material utama pada *3D printing* harus berupa material dalam bentuk bubuk sehingga dapat menghasilkannya campuran yang berupa pasta, namun cepat mengeras. Material yang dapat digunakan adalah sulphur, silica fume, fly ash, blast furnace slag, limestone, nano-silica, dan katalisator yang dapat membantu percepatan pengerasan [3][4]. Material agregat yang digunakan harus lebih kecil daripada 6 mm dan hal tersebut memungkinkan lemahnya struktur bangunan. Untuk mengatasi hal tersebut, maka serat baja dapat digunakan untuk memperkuat beban tekan dan Tarik pada beton *3D printing* dan tahan terhadap cuaca ekstrem [5]. Bangunan *3D printing* yang sudah mengering dapat dilanjutkan pada proses finishing seperti rumah pada umumnya seperti dipleseter, dicat, pemasangan lantai dan penutup atap.

Mengurangi Limbah Konstruksi - Secara global, sektor konstruksi mengkonsumsi 50% sumber daya alam, 40% energi, dan 16% air. Mengingat besarnya konsumsi sumberdaya alam dalam aktivitas konstruksi maka diperlukan perencanaan yang baik dalam pengelolaannya agar tetap memperhatikan aspek keberlanjutannya [12]. Terkait dengan penyediaan kebutuhan manusia akan infrastruktur, seluruh aktivitas konstruksi perlu memperhatikan penghematan sumberdaya alam dan mengurangi jumlah limbah dari aktivitas konstruksi. Inovasi dari *3D printing* membantu sektor kontraktor mengurangi limbah konstruksi saat proses pembangunan. Hal tersebut berkaitan dengan integrasi modelling pada perangkat komputer yang memungkinkan perhitungan akurat terkait volume bangunan yang bahan yang dibutuhkan untuk mencetak bangunan, sehingga material yang digunakan volumenya akan disesuaikan dengan perhitungan secara digital yang tingkat akurasi sangat tinggi. Oleh karena itu tidak akan ada bahan baku yang berlebihan sehingga menghasilkan limbah konstruksi yang sulit terurai bahkan sulit untuk dimanfaatkan kembali.

Meningkatkan Keselamatan Kerja – Indonesia termasuk salah satu negara dengan tingkat kecelakaan kerja tertinggi di Asia Tenggara . Proses konstruksi bangunan memiliki risiko yang tinggi terhadap tukang dalam mengalami kecelakaan kerja, seperti jatuh dari ketinggian, terkena mesin yang bergerak, dan tertabrak kendaraan. Beberapa kasus dalam kecelakaan kerja tersebut berhubungan dengan kelalaian sumber daya manusia. Metode *3D printing* dalam proses konstruksi dapat membantu mengurangi risiko kecelakaan kerja, karena proses pembangunan tidak melibatkan tenaga manusia melainkan kinerja mesin pencetakan. Studi kasus di Rusia menyebutkan, bahwa untuk membangun 1 unit hunian hanya diperlukan 1 orang pekerja yang tugasnya hanya mengawasi perkembangan percetakan, sehingga semakin sedikit SDM yang berkontribusi, hal tersebut akan mengurangi angka kecelakaan kerja [7]. Selain itu, metode *3D printing* pun dapat memberikan efisiensi biaya upah pekerja karena pengurangan jumlah pekerja yang dikerahkan saat proses konstruksi.

3.2 Kendala penerapan metode fabrikasi digital *3D printing* di Indonesia

Kesiapan sumber daya manusia – Mayoritas sumberdaya manusia baik tenaga perencana seperti arsitek maupun tenaga pertukangan belum secara mumpuni menguasai teknologi seperti BIM dan fabrikasi digital. Arsitek kini dituntut untuk menguasai teknologi disamping keahliannya dalam mendesain dan

merencanakan bangunan. Arsitek pun harus menguasai metode membangun secara digital sehingga konsep dari perancangan pun kemungkinan akan berubah dan lebih organik. Prinsip-prinsip perancangan secara konvensional yang telah diketahui dapat sedikit bergeser, dan wawasan arsitek di Indonesia terhadap hal tersebut harus lebih terbuka. Di samping itu, tenaga tukang di Indonesia tidak memiliki sertifikasi pertukangan secara khusus seperti di negara lain, sehingga mayoritas tidak mendapatkan pendidikan pertukangan secara formal dan masih berdasarkan pengalaman. Hal tersebut yang menjadi ancaman bagi tenaga pertukangan yang terbiasa membangun secara konvensional dan tidak dapat mengikuti tuntutan zaman dalam perkembangannya teknologi, sehingga pada akhirnya tenaga mereka akan tergantikan oleh mesin. Hal ini akan menyebabkan peningkatan pengangguran di Indonesia karena kapasitas sumber manusia yang rendah.

Kesiapan bahan dan material – ketersediaan bahan campuran beton yang tidak biasa belum umum ditemui di berbagai pasar di Indonesia. Industri besar di Indonesia masih memproduksi bahan baku yang sifatnya fabrikasi sehingga konsep pembangunan masih mengacu pada bentuk-bentuk yang modular dalam rangka pengurangan limbah konstruksi. Selain itu, belum terdapat banyak penelitian di Indonesia yang membahas mengenai material yang paling tepat untuk digunakan sebagai bahan utama *3D printing*, bahkan masing-masing negara di dunia yang sudah berusaha mengaplikasikannya pada bangunan masih menggali material yang paling optimal untuk digunakan pada metode konstruksi *3D printing*. Oleh karena itu, kemungkinan Indonesia akan mengimpor bahan baku premiks dari negara lain untuk pengaplikasiannya pada konstruksi bangunan. Hal tersebut dinilai tidak efisien dan tidak ramah lingkungan karena bahan baku belum dapat diproduksi secara local, dan belum terdapat industry yang dapat mengolah bahan baku tersebut.

Kesiapan peralatan – Peralatan *3D printing* dalam skala bangunan belum tersedia di Indonesia, sehingga kemungkinannya negara ini harus mengimpor alat tersebut dari negara produsen seperti Jerman. Selain biaya dan membutuhkan investasi yang besar untuk membeli alat tersebut, proses perawatan peralatan pun akan sulit dilakukan karena ketidakterdediaan komponen peralatan (*spare part*) jika peralatan tersebut terdapat kerusakan. Ahli dalam perbaikan mesin tersebut masih sulit untuk ditemukan di Indonesia, sehingga penggunaannya belum dapat optimal

Regulasi dan Uji SNI – Dalam sektor pemerintah, teknologi *3D printing* belum mendapat dukungan dan respon seutuhnya seperti regulasi yang memuat standarisasi bangunan menggunakan metode tersebut. Hal ini dikarenakan struktur dari bangunan yang menggunakan metode tersebut belum teruji secara laboratorium di Indonesia. Alasan lainnya adalah Indonesia merupakan negara yang rawan terhadap bencana seperti banjir, tsunami, angin puting beliung, longsor dan gempa bumi, sementara negara-negara yang sudah mencoba menerapkan metode tersebut hanya mengulas ketahanan terhadap cuaca ekstrem, namun belum mengulas mengenai kekuatan strukturnya terhadap bencana alam. Oleh karena itu, kualitas konstruksi *3D printing* masih memerlukan riset lebih lanjut mengenai ketahanannya dengan kondisi iklim, cuaca, dan topografi kota-kota di Indonesia.

4. SIMPULAN

Metode membangun cepat menggunakan teknologi *3D printing* memberikan sejumlah keuntungan jika dapat diaplikasikan di Indonesia. Hal tersebut memberikan prospek yang tinggi terhadap penyediaan hunian yang layak dan terjangkau di Indonesia serta mempromosikan hunian yang ramah lingkungan. Di sisi lain, terdapat beberapa kendala yang masih menjadi pertimbangan dalam pemanfaatan teknologi tersebut. Bangsa Indonesia merupakan negara berkembang yang masih memerlukan adaptasi dalam menerima revolusi industry 4.0. Kapasitas sumber daya manusia yang rendah masih menjadi permasalahan utama yang harus diselesaikan agar dapat mengimbangi perkembangan teknologi. Sumber daya manusia yang tidak dapat mengimbangi kebutuhan tersebut akan terancam kehilangan pekerjaan karena akan tergantikan oleh mesin. Oleh karena itu, sebelum menghadapi revolusi industri 4.0 di Indonesia, peningkatan kapasitas sumber daya manusia perlu dilakukan seperti pelatihan dan sertifikasi tenaga pertukangan di Indonesia, pelatihan dan sertifikasi kompetensi penggunaan BIM bagi arsitek dan desainer, serta melakukan investasi terhadap penelitian di bidang BIM, material konstruksi *3D printing*

yang sesuai dengan iklim dan kondisi Indonesia, serta eksperimen terhadap uji kekuatan konstruksi menggunakan metode *3D printing* secara digital maupun uji lapangan sesuai dengan kondisi iklim dan bencana yang sering terjadi di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Q. M. Shakir, "3D-printing of Houses," no. December, 2019, doi: 10.13140/RG.2.2.29453.08168.
- [2] "09 3D Printing in Architecture.pdf."
- [3] I. Hager, A. Golonka, and R. Putanowicz, "3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction?," *Procedia Eng.*, vol. 151, pp. 292–299, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.357.
- [4] R. Elnaeem and M. Taglsir, "Applicability of using the 3D concrete printing technology in Sudan," *FES J. Eng. Sci.*, vol. 9, no. 2, pp. 64–70, 2021, doi: 10.52981/fjes.v9i2.679.
- [5] R. Manju, R. Deepika, T. Gokulakrishnan, K. Srinithi, and M. I. Mohamed, "A research on 3d printing concrete," *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, no. 2 Special Issue 8, pp. 1691–1693, 2019, doi: 10.35940/ijrte.B1134.0882S819.
- [6] D. Aghimien, C. Aigbavboa, L. Aghimien, W. D. Thwala, and L. Ndlovu, "Making a case for 3D printing for housing delivery in South Africa," *Int. J. Hous. Mark. Anal.*, vol. 13, no. 4, pp. 565–581, 2020, doi: 10.1108/IJHMA-11-2019-0111.
- [7] S. El-Sayegh, L. Romdhane, and S. Manjikian, "A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 20, no. 2, pp. 1–25, 2020, doi: 10.1007/s43452-020-00038-w.
- [8] A. O. Afolabi, R. A. Ojelabi, I. O. Omuh, and P. F. Tunji-Olayeni, "3D House Printing: A sustainable housing solution for Nigeria's housing needs," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1299, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1299/1/012012.
- [9] T. Osunsanmi, C. Aigbavboa, A. Oke, and I. Ohiomah, "Construction 4.0: Its impact towards delivering quality and sustainable houses in South Africa," no. July, pp. 147–156, 2018, doi: 10.3311/cc2018-020.
- [10] BPS 2018, "Catalog 1101001. *Stat Indonesia. 2018*, vol. 1101001, p. 719, 2018, Online. Available: <https://www.bps.go.id/publication/2018/07/03/5a963c1ea9b0fed6497d0845/statistik-indonesia-2018>
- [11] BPS 2022, "Catalog : 1101001," *Stat. Indones. 2020*, vol. 1101001, p. 790, 2020, [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/publication/2020/04/29/e9011b3155d45d70823c141f/statistik-indonesia-2020.html>
- [12] W. I. E. B. W. S. Surjamanto, "Kajian Reuse Material Bangunan Dalam Konsep Sustainable Construction Di Indonesia," *J. Tek. Sipil*, vol. 12, no. 1, pp. 18–27, 2012, doi: 10.24002/jts.v12i1.616.
- [13] [https://www.nawasis.org/perkimpedia/wiki/data-dan-indikator-pembangunan-perumahan-dan-permukiman/2#:~:text=Rumah%20yang%20layak%20huni%20dan,dan%20\(5\)%20keamanan%20bermukim](https://www.nawasis.org/perkimpedia/wiki/data-dan-indikator-pembangunan-perumahan-dan-permukiman/2#:~:text=Rumah%20yang%20layak%20huni%20dan,dan%20(5)%20keamanan%20bermukim). diakses 11 Juli 2023, pukul 13.22 WIB