

IMPLEMENTASI 3D PRINTING BETON DAN BAJA PADA DESAIN FABRIKASI DI KONSTRUKSI

Nisrina Fahriah Dea P^{1,*}, Oei Fuk Jin¹

¹Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara

Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta Barat 11440

*Corresponding authors: nisrina.327222017@stu.untar.ac.id

Abstract: *The increasing need for development makes humans continue to find more efficient and faster ways. Therefore, technology is also growing rapidly and forcing all sectors to be able to keep up to date so as not to be left behind. The use of 3D Printing is one of the technologies that are beginning to be applied. This 3D Printing technology shows a significant change from conventional construction. The method used in this article is literature review, by collecting previous research literature. This study aims to determine the implementation of 3D Printing on fabrication design in construction. Data obtained from several journals discuss the implementation, advantages, and limitations of 3D Printing in technology, cost and time. Therefore, it is expected to open the views of construction stakeholders to be able to see the potential use of 3D Printing in the construction field.*

Keywords: *3D Printing, Fabrication Design, Robotic, Construction Management, Technology*

Abstrak: Semakin bertingkatnya kebutuhan pembangunan membuat manusia untuk terus menemukan cara yang lebih efisien dan lebih cepat. Oleh karena itu, teknologi juga berkembang pesat dan memaksa semua sektor untuk dapat mengikuti perkembangan agar tidak tertinggal. Penggunaan *3D Printing* merupakan salah satu teknologi yang mulai diterapkan. Teknologi *3D Printing* ini menunjukkan perubahan yang signifikan dari konstruksi konvensional. Metode yang digunakan dalam artikel ini yakni *literatur review*, dengan menggumpulkan literatur penelitian terdahulu. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui implementasi *3D Printing* pada desain fabrikasi di konstruksi. Data yang diperoleh dari beberapa jurnal membahas mengenai implementasi, keunggulan, dan keterbatasan *3D Printing* dalam teknologi, biaya dan waktu. Oleh karena itu, diharapkan dapat membuka pandangan para *stakeholder* konstruksi untuk dapat melihat potensi penggunaan *3D Printing* dalam bidang konstruksi.

Kata kunci : *3D Printing, Desain Fabrikasi, Robotik, Manajemen Konstruksi, Teknologi*

PENDAHULUAN

Sektor industri menghadapi masalah kurangnya tenaga kerja, salah satu negara yang yakni Amerika menghadapi kekurangan tenaga kerja sebesar 650.000 pada tahun 2022 pada sektor konstruksi (Xu et al. 2022). Sektor industri perlu ditingkatkan produktivitas secara signifikan dalam memenuhi permintaan saat ini dan masa depan (Marwan Gharbia, Alice Chang-Richards, Yuqian Lu, Ray Y. Zhong 2020). Selain itu, perkembangan teknologi dengan adanya teknologi *3D Printing* telah mengubah desain dan proses manufaktur di sektor konstruksi. Dibandingkan dengan beton bertulang dengan proses cor ditempat dan beton pracetak, adanya pencetakan beton *3D Printing* dapat menggantikan proses “*molding-solidifying*” yang umum dengan ekstruksi

berlapis, sehingga menghilangkan ketergantungan terhadap bekisting, menyederhanakan langkah - langkah manual, dan mengurangi tenaga kerja. Namun, masih terdapat beberapa kekurangan dalam penerapan *3D Printing* pada penerapan konstruksi skala nyatanya, yakni terbatasnya oleh sifat material, mekanisme printer, proses ekstra yang memakan tenaga, waktu dan material yang dimasukkan manual dalam proses pencetakannya.

Penggunaan *3D printing* beton dari geometri kompleks merupakan skala besar yang telah dipelajari sebelumnya, dan diterapkan baru - baru ini. Elemen beton berbentuk organik telah dibuat menggunakan algoritma, dan telah dicetak menggunakan beton berkekuatan tinggi. Apabila skala nyata elemen struktural yang berfungsi penuh, beton harus diperkuat dengan

baja yang mendistribusi gaya internal yang dihasilkan dari efek eksternal dengan lebih baik. Akan tetapi beton bertulang serat hanya bisa dalam ketinggian tertentu, karena tulangan terputus-putus tidak akan memberikan kekuatan tarik yang cukup untuk elemen struktural (Abou Yassin, Hamzeh, and Al Sakka 2020).

Oleh karena itu, artikel ini dibuat untuk memperkenalkan alur kerja desain hingga pencetakan serta memberikan referensi untuk proyek pembangunan di masa depan.

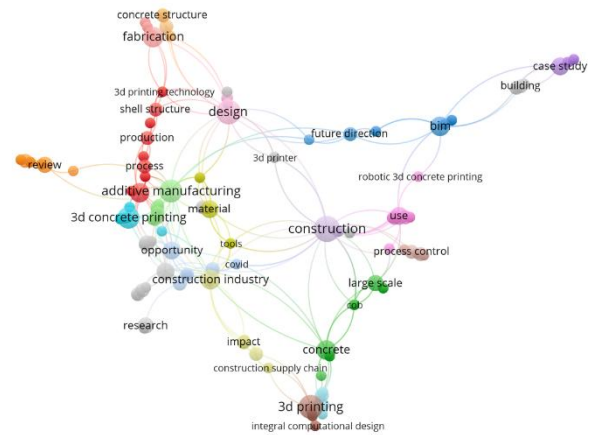
METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penulisan dengan cara peninjauan penelitian - penelitian sebelumnya sehingga memberikan referensi yang dapat digunakan dalam penulisan. Metode yang digunakan yakni metode *literatur review* yang mendefinisikan istilah atau kata kunci dalam pencarian sesuai dengan tujuan pencarian literatur dan mencari data yang sesuai (Clyde Zhengdao Li, Zhenchao Guo, Dong Su, Bing Xia 2022).

Penggunaan *software* Publish or Perish (PoP) dapat dicari dengan berdasarkan nama penulis, tempat publikasi, judul artikel, kata kunci, pencarian berdasarkan tahun dan ISSN. Tahap selanjutnya dalam penggunaan PoP ini yakni memindahkan data yang didapat dari PoP ke dalam aplikasi mendeley, kemudian data di cek satu per satu berdasarkan aspek : penulisan nama penulis di artikel, judul, tahun terbit, dan komponen lainnya (Mahsusi and Hudaa 2022).

Alat penggalian literatur yakni dikenal dengan VOSViewer yang dapat digunakan mengklasifikasikan dan menganalisis literatur yang dikumpulkan berdasarkan kata kunci, dan dapat menampilkan hasil analisis secara visual (Clyde Zhengdao Li, Zhenchao Guo, Dong Su, Bing Xia 2022).

Gambar 1 penelitian ini menunjukkan VOSViewer untuk menganalisis hubungan jaringan bibliometrik teknologi 3D *Printing* dalam sektor konstruksi dan fabrikasi pencetakan beton. Manfaat dari metode penggunaan metode tinjauan sistematis ini yakni bahwa peneliti dapat merangkum bukti dari suatu fenomena, mengidentifikasi celah dalam penelitian sekarang dengan penelitian terdahulu dan memberikan ide serta hipotesis baru (Marwan Gharbia, Alice Chang-Richards, Yuqian Lu, Ray Y. Zhong 2020).



Gambar 1. Hasil Pencarian VosViewer (Sumber Data,2023)

Material 3D *Printing* dalam Skala Arsitektur

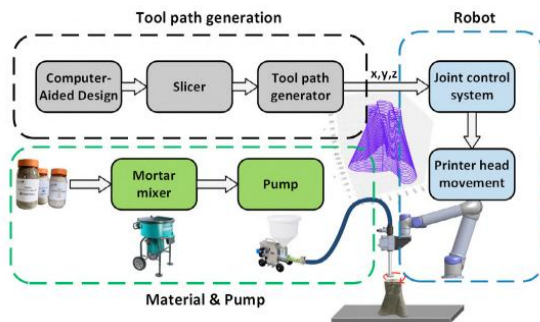
Berbagai sektor industri pemanfaatan material dan teknologi 3D *Printing* bervariasi, misal seperti sektor konstruksi, bahan yang paling umum digunakan beton yakni semen portland namun proses produksi semen portland sangat intensif dan menghasilkan emisi karbon yang tinggi. Oleh karena itu, alternatif material yang digunakan seperti *geopolymer mortar* dan *sulfo-aluminate cement* (SC), sehingga mengurangi emisi karbon dalam proses 3D *Printing*. *Sulfo-aluminate cement* (SC) terbukti tidak hanya melepaskan karbon dioksida jauh lebih sedikit daripada semen portland dalam proses produksi, tetapi juga mempunyai sifat yang dapat dicetak seperti kekuatan usia dini yang tinggi dan waktu pengaturan yang singkat. Oleh sebab itu, *sulfo-aluminate cemen* (SC) menjadi material yang sangat potensial dalam proses 3D *Printing* skala arsitektur (Xu et al. 2022).

Transisi Fabrikasi Robot di Era Digital

Sebagai salah satu sektor pilar perekonomian dinegara China, hingga proporsi nilai mencapai 7,01% dalam sektor konstruksi biaya tenaga kerja merupakan salah satu biaya essensial dalam sektor ini. Fabrikasi robot merupakan menjadi salah satu peluang untuk meningkatkan sektor konstruksi dikarenakan dengan semakin berkurangnya tenaga kerja, teknologi yang terbelakang, pemborosan dalam sumber daya produksi serta *soft skill* pekerja dalam beberapa tahun terakhir. Oleh karena itu 3D *printing* ini

mulai digunakan sebagai salah satu solusi dalam penanganan masalah tersebut (Luo, Gao, and Yuan 2023).

Secara umum, proses 3D *Printing* terdapat pada Gambar 2, sebelum dimulainya pekerjaan cetak langkah awal yakni sebuah desain yang dirancang menggunakan *Computer Aided Design* (CAD) berdasarkan geometri CAD yang dirancang melalui perangkat lunak serta menentukan jalur alat yang di ikuti oleh printer 3D nozzle selama proses pencetakan. Langkah kedua bahan disiapkan sesuai dengan proporsi campuran didalam *mixer* mortar. Kualitas 3D *Printing* tergantung pada sifat campuran materialnya. Oleh Sebab itu, batching beton dihitung agar memenuhi persyaratan yang disesuaikan dengan kebutuhan yang akan dicetak. Kemudian, sistem pencetakan akan dilakukan dan di kalibrasi untuk memulai tahap pencetakan. Beton akan di ekstrusi dan diendapkan lapis demi lapis untuk membentuk sesuai dengan bentuk yang dirancang (Merzouki 2023).



Gambar 2. Proses 3D *Printing* (Merzouki 2023)

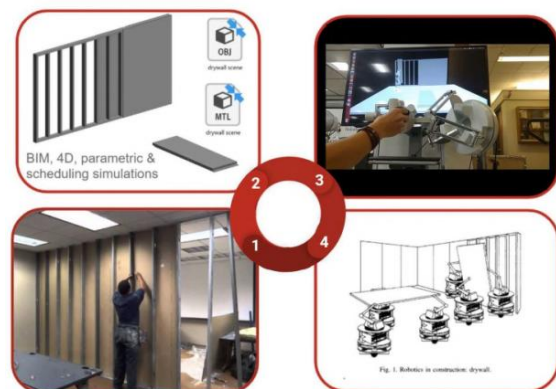
Peran Robotika dalam 3D *Printing*

Dalam sektor konstruksi, penggunaan teknologi robotik memiliki keunggulan dalam meningkatkan kualitas pada hasil akhir dan mengurangi biaya berkat optimalisasi waktu dan sumber daya. Proses 3D *Printing* robot yang digunakan dilengkapi dengan *nozzle*, yang mampu mengekstrusi lapisan bahan semen dengan dimensi tertentu. Tujuan dari robot yakni untuk menghasilkan gerakan dan persendian yang dibuat oleh lengan dan tangan manusia, yang memungkinkan kebebasan hingga 7 derajat. Keuntungan terbesar yakni meningkatnya efisiensi dalam konstruksi, mengurangi terjadinya kesalahan, peningkatan keselamatan kerja (Eric Forcael, Javier Pérez,

Álvaro Vázquez, Rodrigo García Alvarado, Francisco Orozco 2021).

Pemasangan Dinding Kering

Pemasangan dinding kering ini menggunakan lingkungan simulasi robot yakni *Simulation and Active Interfaces* (SAI). Pendekatan ini menggabungkan kombinasi perilaku otonom dan interaksi gerakan terpandu untuk kolaborasi antara manusia dan robot. Robot dapat meningkatkan kualitas dan mengurangi ketegangan yang diperlukan untuk melakukan tugas secara manual, sementara para pekerja menyumbangkan pengetahuan dan pengalaman (Brosque et al. 2020).



Gambar 3. Proses Implementasi konvensional Ke Dalam Robot (Brosque et al. 2020)

Pemasangan dinding kering yang telah diamati selama seminggu dengan 1 anggota mengerjakan dalam proyek X di Swedia terdapat pada Gambar 3. Lingkungan kerja yang berdebu dan bising, membutuhkan pelindung pendengaran. Pekerja menyatakan keprihatinan tentang cedera yang berlebihan dari waktu ke waktu saat melakukan pekerjaan tersebut.

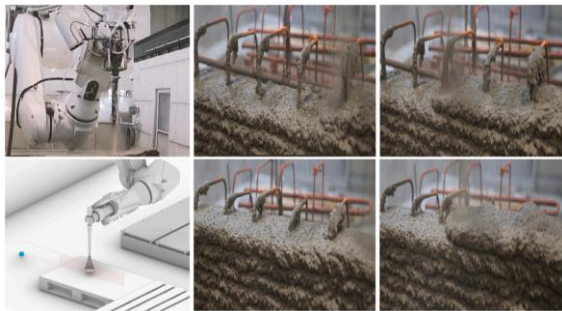
Proses yang terdapat pada Gambar 3 yakni :

1. Mengumpulkan data dan produksi dilokasi
2. Menghasilkan gerak realistis untuk simulasi
3. Simulasi robot dilingkungan virtual yang memungkinkan interaksi dan kontrol
4. Memasukkan saran dari sektor konstruksi untuk mengulangi solusi desain

Ada hal - hal yang perlu dipertimbangkan yakni : mobilitas dan navigasi dilingkungan yang tidak terstruktur dengan pekerja dan objek yang tidak terduga, manipulasi objek dengan satu atau dua lengan dari tumpukan horizontal ke stud vertikal, indentifikasi lokasi stud individu, umpan balik sensorik dari kontrak antara papan dan ruangan.

Teknik Pencetakan Beton Robotik

Pada pencetakan beton 3D selain menggunakan metode *particle-bed* dan ekstrusi yakni menggunakan metode *shotcrete*. Metode *shotcrete* dapat menutupi *gap* antar tulangan yang telah dipasang contohnya dalam konstruksi terowongan.



Gambar 4. Proses pencetakan shotcrete robotik untuk produksi otomatis sampel balok (Baghdadi et al., 2023)

Pada Gambar 4 elemen beton direkayasa menggunakan kinematik lengan robot, *Digital Building Fabrication Laboratory* (DBFL). Pada proses pencetakan yang berpengalaman, perencanaan jalur robotik dikembangkan dalam Rhino 3D dengan menetapkan dimensi area pencetakan, jumlah lapisan, kecepatan proses dan tinggi area pencetakan (dalam contoh diatas dimensi balok adalah 12,5 x 10 x 100 cm) (Abtin Baghdadi,, Lukas Ledderose, Shaghayegh Ameri 2023) tidak terdapat semprotan bayangan yang terdeteksi di sekitar tulangan dalam video yang diambil dengan kamera berkecepatan tinggi, dan menunjukkan kesesuaian dengan perencanaan desain. Dalam penelitian kamera merekam waktu tekanan selama 4 menit untuk tekanan balok beton bertulang sepanjang 1 meter.

Penyemprotan beton robotik otomatis

Pada produksi dalam bentuk melengkung dapat dilakukan dengan adanya fleksibilitas penyemprotan robotik. Mengoptimalkan distribusi material, cangkang memiliki ketebalan yang bervariasi yakni dari ukuran 3 cm hingga 6 cm, dan rusuk dengan ketebalan 6 cm. Pada proses penyemprotan, tahapan pemadatan merupakan hal penting karena dapat memberikan peningkatan kualitas dan kekuatan komponen struktural. Pada Gambar 5 menunjukkan sebuah robot penyemprotan beton memiliki lengan robot dengan type ABB IRB 6400R dengan jangkauan 2,8 meter dan muatan 200kg (Oval, et al., 2022)



Gambar 5. Penyemprotan beton robotik otomatis pada segmen cangkang bergaris dengan kelengkungan ganda dan ketebalan bervariasi (Oval et al., 2022)

Pekerjaan Pengecoran

Pada proyek ini robot bergerak membuat jaring baja yang rumit secara geometris secara otomatis membengkokkan, memotong, dan mengelas tulangan baja diameter 8 mm langsung dilokasi konstruksi. Beton dan finish permukaan dilakukan secara manual pada tahap berikutnya. Salah satu tantangan dalam penerapan penutup beton adalah memastikan ketebelan penutup yang konsisten sebesar 3 cm, dan memberikan keamanan yang cukup untuk menghindari korosi pada tulangan baja (Khader;Tom 2021).



Gambar 6. Workflow tahapan pengecoran (Khader;Tom 2021)

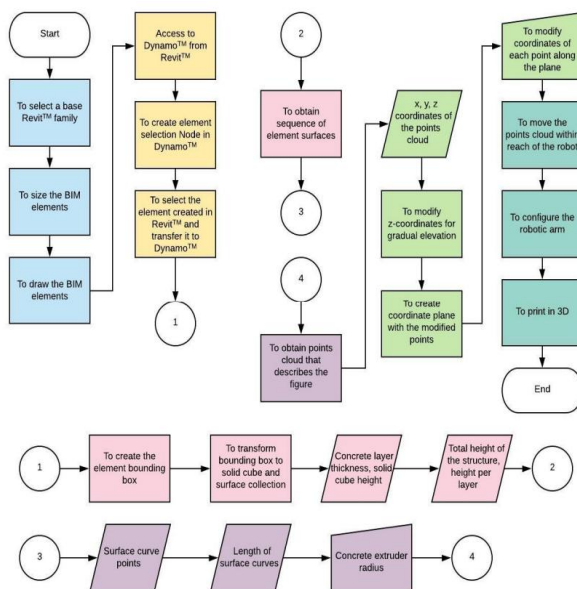
Tahapan a: Fabrikasi ditempat dengan robot

Tahapan b: Proses pengecoran manual

Tahapan c: Dinding yang sudah selesai

Langkah - langkah integrasi *building information modelling (BIM)* dan 3D printing

Tahapan ini bertujuan untuk menampilkan ringkasan pengembangan prosedur komputer yang diperlukan agar komunikasi model yang dirancang dalam perangkat BIM dan elemen 3D printing beton dengan menggunakan Dynamo, plugin revit (Eric Forcael, Javier Pérez, Álvaro Vázquez, Rodrigo García Alvarado, Francisco Orozco 2021).

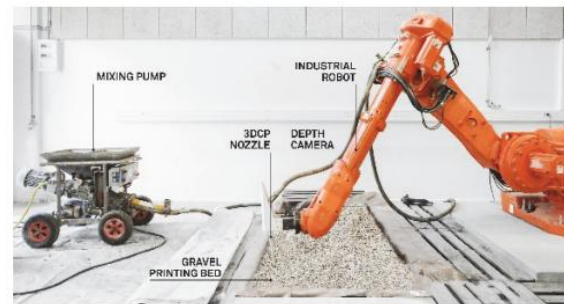
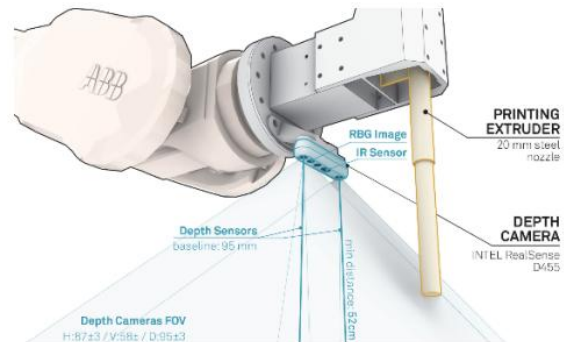


Gambar 7. Flowchart BIM 3D Printing (Forcael et al., 2021)

Kamera seri Intel RealSense D400 yang digunakan untuk mendapatkan 3D point cloud dan berwarna. Data 3D disesuaikan dengan pixel gambar melalui Intel RealSense SDK. Data ini digunakan untuk menyaring lingkungan pencetakan yang tidak diketahui serta untuk memantau objek yang dicetak selama proses fabrikasi dan memverifikasi penyimpangan yang ada. (Roberto Naboni, Luca Breseghello 2022).

Kamera dipasang pada penghubung keenam sumbu robot, sekitar 0,3 mm dari tool center point (TCP). Terjemahan dari TCP pada bidang XY dihitung dengan memeriksa posisi relatif

Field of View (FOV) terhubung ke nozzle (Roberto Naboni, Luca Breseghello 2022).



Gambar 8. Kamera dan 3D printing (Roberto et al., 2022)

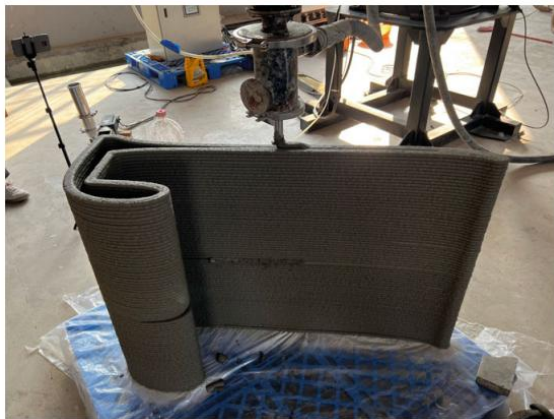
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil tinjauan menunjukkan bahwa robot konstruksi dilokasi lebih cenderung berinovasi melalui pengembangan lebih lanjut dalam segi desain dan material di era arsitektur baru, yang dikombinasikan dengan proses 3D printing. Penggunaan bahan bangunan dalam desain teknik dapat berkembang dan membuka peluang untuk inovasi dalam konstruksi (Marwan Gharbia, Alice Chang-Richards, Yuqian Lu, Ray Y. Zhong 2020). Pada saat yang sama, penekanan studi yang relevan di masa depan harus diturunkan ke arah pengembangan platform robotik mutakhir, khususnya platform udara dan bawah air, yang saat ini kurang dalam hal penerapan praktis dan efektif. Oleh karena itu, studi di masa depan terutama harus fokus pada efektivitas praktis dan platform robotik bawah air dengan pengujian dan evaluasi praktis pada infrastruktur sipil yang sebenarnya (Ahmed, La, and Gucunski 2020).

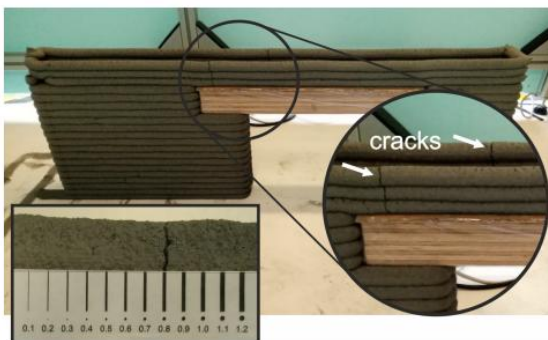
Metode ini mencakup pengumpulan konteks dan data produksi dari lapangan, menghasilkan adegan realistis untuk simulasi, dan

mensimulasikan solusi robotik dalam lingkungan virtual yang memungkinkan interaksi dan kontrol haptic, dan dapat menggabungkan umpan balik sektor konstruksi untuk beralih pada desain sebelum beralih pada perangkat keras. Tinjauan ini diharapkan kolaborasi manusia dan robot dalam konstruksi menjadi cara yang efisien untuk melakukan robotisasi dalam proses manual yang mungkin rumit untuk diotomatisasi sepenuhnya tanpa pengawasan (Brosque et al. 2020).

Tinjauan saat ini menunjukkan bahwa metode integrasi yang diusulkan memiliki perilaku struktur dan tampilan permukaan yang berbeda. Semakin besar komponennya, semakin banyak deformasi dan retakan yang terjadi (Luo, Gao, and Yuan 2023).



Gambar 9. Proses Printing (Luo et al., 2023)



Gambar 10. Crack pada proses printing (Marcin et al., 2020)

Oleh karena itu membuat proses persetujuan konstruksi 3D printing lebih lama dibandingkan menggunakan metode konstruksi tradisional

(Siavash H. Khajavi, Müge Tetik, Ashish Mohite, Antti Peltokorpi, Mingyang Li 2021).

Yang perlu diperhatikan dalam proses pencetakan yakni perlu diberikannya konsistensi campuran beton. Peningkatan viskositas akan mempengaruhi ekstrusi campuran dan kualitas struktur 3D printing yang telah selesai. Tahapan untuk menjaga kekentalan campuran pada tingkat yang diinginkan meliputi pencampuran terus menerus, perlindungan dari kehilangan kelembapan yang berlebihan, penggunaan batch material yang lebih kecil dan produksi yang berkelanjutan (Norman Hack, Mohammad Bahar, Christian Hühne, William Lopez, Stefan Gantner 2020).

Aplikasi ini dibuat untuk menghubungkan BIM yang dikembangkan untuk menghasilkan model geometri terperinci dari modul cetak 3D, sehingga pengguna dapat mengatasi gangguan pada tahap awal. Proses pembuatan prototipe ini mendukung validasi desain dan menyediakan model geometri yang lebih akurat untuk diproduksi sehingga memberikan fungsi kontrol akurasi yang lebih baik, produktivitas lebih tinggi, dan pengurangan sisa material (Rui He, Mingkai Li, Vincent J.L. Gan 2021).

DAFTAR PUSTAKA

- Abou Yassin, Abd Allah, Farook Hamzeh, and Fatima Al Sakka. 2020. "Agent Based Modeling to Optimize Workflow of Robotic Steel and Concrete 3D Printers." *Automation in Construction* 110(September 2018): 103040. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103040>.
- Abtin Baghdadi,, Lukas Ledderose, Shaghayegh Ameri, Harald Kloft. 2023. "Experimental and Numerical Assessments of New Concrete Dry Connections Concerning Potentials of Robotic CNC Manufacturing Technique." *Engineering Structures* 280. <https://api.elsevier.com/content/article/eid/1-s2.0-S0141029623000196>.
- Ahmed, Habib, Hung Manh La, and Nenad Gucunski. 2020. "Review of Non-Destructive Civil Infrastructure Evaluation for Bridges: State-of-the-Art Robotic Platforms, Sensors and Algorithms." *Sensors (Switzerland)* 20(14): 1–38.
- Brosque, Cynthia, Elena Galbally, Oussama Khatib, and Martin Fischer. 2020.

- “Human-Robot Collaboration in Construction: Opportunities and Challenges.” *HORA 2020 - 2nd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications, Proceedings*.
- Clyde Zhengdao Li, Zhenchao Guo, Dong Su, Bing Xia, and Vivian W. Y. Tam. 2022. “The Application of Advanced Information Technologies in Civil Infrastructure Construction and Maintenance.” *Sustainability (Switzerland)* 14(13). https://api.elsevier.com/content/abstract/scopus_id/85133346935.
- Eric Forcael, Javier Pérez, Álvaro Vázquez, Rodrigo García Alvarado, Francisco Orozco, Javier Sepúlveda. 2021. “Development of Communication Protocols between Bim Elements and 3D Concrete Printing.” *Applied Sciences (Switzerland)* 11(16). https://api.elsevier.com/content/abstract/scopus_id/85112326224.
- Khader; Tom, Rothe; Norman Hack; Mohammad Bahar; Christian Hühne; William Lopez; Stefan Gantner; Noor. 2021. “Development of a Robot-Based Multi-Directional Dynamic Fiber Winding Process for Additive Manufacturing Using Shotcrete 3d Printing.” *Fibers* 9(6). https://api.elsevier.com/content/abstract/scopus_id/85108717881.
- Luo, Jiaxiang, Tianyi Gao, and Philip F. Yuan. 2023. Part F1309 Computational Design and Robotic Fabrication *Fabrication of Reinforced 3D Concrete Printing Formwork*. Springer Nature Singapore. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-19-8637-6_44.
- Mahsusi, Mahsusi, and Syihaabul Hudaa. 2022. “Peningkatan Kemampuan Penulisan Karya Ilmiah Mahasiswa Melalui Pengenalan Aplikasi Publish or Perish.” *JMM (Jurnal Masyarakat Mandiri)* 6(3): 2113.
- Marwan Gharbia, Alice Chang-Richards, Yuqian Lu, Ray Y. Zhong, Heng Li d. 2020. “Robotic Technologies for On-Site Building Construction: A Systematic Review.” *Journal of Building Engineering* 32. <https://api.elsevier.com/content/article/eid/1-s2.0-S2352710220313607>.
- Merzouki, Xinrui Yang; Othman Lakkhal; Abdelkader Belarouci; Kamal Youcef-Toumi; Rochdi. 2023. “Adaptive Estimation and Detection of Filament Width Deviation during 3D Robotic Printing of Construction Materials.” *IFAC PapersOnLine* 56(2): 2341–46. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1204>.
- Norman Hack, Mohammad Bahar, Christian Hühne, William Lopez, Stefan Gantner, Noor Khader and Tom Rothe. 2020. “Automation in the Construction of a 3D-Printed Concrete Wall with the Use of a Lintel Gripper.” *Materials* 13(8). https://api.elsevier.com/content/abstract/scopus_id/85084612855.
- Roberto Naboni, Luca Breseghello, Sandro Sanin. 2022. “Environment-Aware 3D Concrete Printing through Robot-Vision.” *Proceedings of the International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe 2*(September): 409–18.
- Rui He, Mingkai Li, Vincent J.L. Gan, Jun Ma. 2021. “BIM-Enabled Computerized Design and Digital Fabrication of Industrialized Buildings: A Case Study.” *Journal of Cleaner Production* 278. <https://api.elsevier.com/content/article/eid/1-s2.0-S0959652620335502>.
- Siavash H. Khajavi, Müge Tetik, Ashish Mohite, Antti Peltokorpi, Mingyang Li, Yiwei Weng and Jan Holmström. 2021. “Additive Manufacturing in the Construction Industry: The Comparative Competitiveness of 3d Concrete Printing.” *Applied Sciences (Switzerland)* 11(9). https://api.elsevier.com/content/abstract/scopus_id/85105623290.
- Xu, Weiguo et al. 2022. “Toward Automated Construction: The Design-to-Printing Workflow for a Robotic in-Situ 3D Printed House.” *Case Studies in Construction Materials* 17(August): e01442. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01442>.