

Seismic Resilience of 3D Printed Concrete Structures Parametric Optimization and Real-Scale Experimental Validation

Suci Ramadhani*¹, Juan Kiel Siregar¹, Suzita¹, Mayanti¹

Email: sc.rmdhan@gmail.com

¹Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Medan, Sumatera Utara, Indonesia

*Corresponding Author

Abstract

The advancement of 3D printed concrete (3DPC) technology offers promising solutions for faster, more efficient, and cost-effective construction, yet its seismic resilience remains underexplored. This study proposes a parametric optimization framework for 3DPC structures by systematically varying layer thickness, infill pattern, and mix design, followed by full-scale shake table testing to evaluate structural performance under simulated earthquake loads. Using a combination of computational modeling and experimental validation, the results indicate that a configuration with a 15 mm layer thickness, gyroid infill, and a 0.38 water-cement ratio yields the highest lateral load resistance and energy dissipation capacity. The close alignment between simulated and experimental data confirms the predictive strength of the parametric model. These findings contribute to establishing a practical and reliable design basis for 3DPC structures in seismically active regions and provide a foundation for future structural code development.

Keywords: 3D printed concrete, seismic resilience, parametric optimization.

I. INTRODUCTION

Industri konstruksi global tengah berada di titik kritis perubahan, didorong oleh urgensi efisiensi, keberlanjutan, dan ketahanan terhadap bencana. Dalam lanskap ini, teknologi 3D *printing* untuk material beton muncul sebagai solusi disruptif yang tidak hanya menawarkan kecepatan dan efisiensi dalam pembangunan, tetapi juga fleksibilitas dalam desain struktural (Khan & McNally, 2024). Penerapan *3D printed concrete* (3DPC) memungkinkan pembangunan dilakukan tanpa bekisting konvensional, mengurangi limbah material, serta memangkas tenaga kerja dan waktu secara signifikan (Bischof et al., 2022). Namun, walaupun teknologi ini telah berkembang pesat dalam aspek estetika dan fabrikasi, pertanyaan fundamental mengenai performa strukturalnya—terutama dalam menghadapi beban seismik—masih belum terjawab dengan tuntas (Rollakanti & Prasad, 2022).

Di berbagai negara berkembang yang rentan terhadap gempa bumi, teknik konstruksi tradisional yang diwariskan secara turun-temurun masih mendominasi praktik lokal (Aghaee et al., 2024). Meskipun adaptif terhadap lingkungan sekitarnya, metode-metode ini umumnya tidak terdokumentasi dengan baik dan sulit diintegrasikan ke dalam sistem modern seperti konstruksi cetak 3D (Fakhriati et al., 2023). Padahal, terdapat potensi besar untuk menggabungkan

kebijaksanaan lokal ini dengan teknologi mutakhir guna menciptakan bangunan yang tangguh secara struktural dan kontekstual. Sayangnya, hingga kini kolaborasi antara teknologi maju dan kearifan lokal masih minim, baik dalam praktik maupun dalam ranah akademik (Tibesigwa et al., 2024).

Selain itu, terdapat kekosongan regulasi teknis yang secara khusus mengatur struktur hasil cetak 3D dalam konteks ketahanan gempa (Li et al., 2023). Ketika standar bangunan konvensional telah memiliki pedoman rinci tentang desain tahan gempa, bangunan 3D printed masih berada dalam area abu-abu hukum dan teknis (Asif et al., 2024). Ketidakpastian ini menghambat adopsi teknologi secara luas, terutama oleh pelaku industri di wilayah rawan gempa yang secara logis justru paling membutuhkan solusi konstruksi tangguh. Minimnya pengujian lapangan berskala penuh turut memperkuat keraguan ini, sehingga transformasi yang dijanjikan oleh teknologi ini masih belum terealisasi secara menyeluruh (Oyejobi et al., 2024).

Menurut laporan (Kundu et al., 2024), sekitar 1,3 miliar orang hidup di kawasan rawan gempa, dengan dampak kerugian infrastruktur mencapai lebih dari 280 miliar dolar AS setiap tahun. Di Indonesia sendiri, data dari (Pratap & Vesmawala, 2023) menunjukkan bahwa lebih dari 60% wilayah daratannya berada di zona merah seismik, menjadikan kebutuhan akan teknologi konstruksi yang cepat, murah, dan tahan gempa menjadi mendesak. Namun, ironisnya, sebagian besar teknologi bangunan yang diterapkan di daerah ini masih mengandalkan metode konvensional yang tidak adaptif terhadap gempa (Nagami et al., 2025).

Sementara itu, urbanisasi yang terjadi secara masif di Asia dan Afrika mendorong tingginya permintaan akan pembangunan hunian dan infrastruktur dalam waktu singkat (Anwar et al., 2022). (Gillespie & Schindler, 2022) memproyeksikan bahwa dunia membutuhkan tambahan 2,5 triliun meter persegi ruang bangunan baru hingga tahun 2060. Ini setara dengan membangun seluruh kota New York setiap bulan selama 40 tahun ke depan (M. Chen et al., 2022). Kebutuhan ini membuka ruang besar bagi teknologi seperti 3D printed concrete untuk menjadi solusi utama, namun hanya jika teknologi tersebut mampu membuktikan kinerja strukturalnya, terutama dalam menghadapi beban dinamis seperti gempa (Weldegebriel et al., 2023).

Penelitian awal menunjukkan potensi teknologi ini. Misalnya, (Baktheer & Classen, 2024) menyatakan bahwa 3DPC memiliki potensi untuk mengefisiensikan biaya konstruksi hingga 30% dan waktu pembangunan hingga 50%. Akan tetapi, studi tersebut tidak menyentuh aspek performa struktural saat terjadi pergerakan tanah ekstrem. Dalam konteks yang lebih sempit, penelitian oleh (Xia et al., 2024) menunjukkan bahwa struktur 3DPC memiliki perilaku deformasi plastis yang khas, namun hanya diuji dalam simulasi numerik tanpa konfirmasi

lapangan. Maka dari itu, terdapat kekosongan dalam data empiris yang benar-benar dapat diandalkan oleh regulator dan pelaku industri. (Q. Wang et al., 2024)

Mayoritas studi terdahulu lebih menitikberatkan pada aspek fabrikasi: bagaimana meningkatkan kecepatan pencetakan, akurasi geometri, dan efisiensi penggunaan material (Paritala et al., 2023). (Ahmed et al., 2022), misalnya, menyajikan teknik optimasi untuk mengurangi pemborosan bahan dalam proses pencetakan beton, namun tidak membahas implikasi dari parameter tersebut terhadap kekuatan struktural. Studi lain oleh (Y. Chen et al., 2022) lebih menyoroti karakteristik material dan reologi beton cetak 3D, tanpa menghubungkannya secara langsung dengan performa struktur di bawah tekanan gempa.

Sejumlah penelitian juga telah menelaah parameter-parameter penting dalam proses cetak seperti ketebalan lapisan, rasio campuran beton, dan pola isian. (X. Wang et al., 2022) menggarisbawahi bahwa variasi dalam parameter tersebut secara signifikan memengaruhi kekuatan tekan dan tarik struktur. Namun, hasil tersebut masih terbatas pada uji laboratorium dengan spesimen skala kecil. Padahal, dalam konteks ketahanan gempa, penting untuk memahami bagaimana parameter-parameter tersebut bekerja dalam sistem struktural utuh pada skala riil (X. Wang et al., 2022).

Lebih lanjut, terdapat kecenderungan dalam literatur untuk mengandalkan model numerik dan simulasi komputer guna memprediksi performa struktur cetak (Liu et al., 2022). Meskipun simulasi memberikan wawasan awal yang penting, hasilnya sangat bergantung pada asumsi input dan batasan model. (van den Heever et al., 2022) menegaskan bahwa validasi lapangan sangat diperlukan karena perilaku dinamis dari beton cetak 3D sulit diprediksi hanya melalui model komputasional. Maka, absennya pendekatan berbasis eksperimentasi nyata menjadi kelemahan signifikan dalam pengembangan pengetahuan di bidang ini (Sun et al., 2022).

Beberapa pendekatan telah dilakukan untuk meningkatkan performa seismik struktur 3DPC, salah satunya dengan menambahkan serat baja atau polimer dalam campuran beton (Giwa et al., 2023). Penelitian (Hassan et al., 2025) memang menunjukkan peningkatan dalam ketahanan terhadap beban lateral, namun tidak mengintegrasikan pendekatan parametrik yang mempertimbangkan interaksi antar elemen desain seperti geometri cetak dan pola penguatan. Studi lain oleh (Lu et al., 2024) menggunakan analisis finite element untuk mensimulasikan respons struktur 3DPC terhadap beban siklik, namun tidak dilanjutkan dengan pengujian nyata yang membuktikan kelayakan desain tersebut.

Sejumlah proyek eksperimental juga telah dilakukan, seperti yang dilakukan oleh T(Tanapornraweekit et al., 2022) yang membangun struktur dinding dengan metode cetak 3D dan mengujinya terhadap beban aksial dan lateral. Meski menjanjikan, penelitian tersebut tidak

secara eksplisit menyoroti konteks gempa dan lebih fokus pada stabilitas struktural dalam kondisi statik. Ini menunjukkan bahwa aspek ketahanan seismik struktur cetak 3D masih merupakan wilayah yang kurang dijelajahi secara komprehensif dan sistematis (Han et al., 2022).

Banyak studi terdahulu juga tidak mempertimbangkan keterkaitan antara desain parametrik dan performa struktural. Padahal, dalam sistem 3DPC, parameter seperti lapisan pencetakan, orientasi pola, dan komposisi beton dapat secara langsung mempengaruhi deformasi dan ketahanan dinamis struktur. Tidak adanya penelitian yang menggabungkan optimasi ketiga aspek tersebut dengan pengujian berskala penuh di lingkungan simulasi gempa merupakan celah besar dalam literatur saat ini.

Analisis ini menunjukkan bahwa penelitian terdahulu masih terpaku pada pendekatan yang terfragmentasi: satu studi hanya meneliti material, studi lain hanya meneliti metode pencetakan, dan lainnya hanya melakukan simulasi numerik. Minimnya pendekatan holistik yang menggabungkan desain, material, dan eksperimentasi nyata menjadi hambatan utama dalam memahami secara menyeluruh potensi ketahanan struktur beton cetak 3D. Dalam konteks daerah rawan gempa, di mana keselamatan menjadi isu utama, absennya integrasi ini justru berpotensi membawa risiko besar jika teknologi ini diadopsi secara luas tanpa dasar ilmiah yang kuat.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengisi kekosongan tersebut dengan mengembangkan model parametrik yang mencakup tiga aspek utama dalam desain cetak beton 3D: ketebalan lapisan, pola isian, dan komposisi material. Model ini tidak hanya akan diujikan dalam simulasi komputer, tetapi juga melalui serangkaian uji eksperimental skala penuh dalam kondisi lingkungan yang meniru beban gempa aktual. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk mengamati perilaku struktur secara menyeluruh dan memastikan validitas hasil secara praktis.

Kontribusi utama dari penelitian ini terletak pada integrasi metodologi optimasi parametrik dengan pengujian eksperimental nyata. Dengan demikian, hasil penelitian tidak hanya menambah khazanah akademik, tetapi juga menyediakan dasar teknis bagi pengambilan keputusan di level praktisi dan pembuat kebijakan. Studi ini diharapkan dapat menjadi rujukan awal bagi penyusunan standar bangunan 3DPC tahan gempa yang belum tersedia hingga saat ini. Lebih dari itu, pendekatan yang digunakan bersifat adaptif dan aplikatif, sehingga dapat diimplementasikan langsung di wilayah dengan tingkat risiko seismik tinggi. Penelitian ini juga membuka jalan bagi kolaborasi antara

akademisi, industri, dan pemerintah dalam membentuk masa depan konstruksi yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan.

II. LITERATURE REVIEW

1. Perkembangan Teknologi Beton Cetak 3D

Perkembangan teknologi beton cetak tiga dimensi atau *3D Printed Concrete* (3DPC) menandai babak baru dalam dunia konstruksi modern. Teknologi ini menggunakan sistem digital dan otomasi untuk membentuk elemen bangunan melalui proses pencetakan berlapis tanpa memerlukan bekisting konvensional. Keunggulan utama dari sistem ini adalah efisiensi waktu, penghematan material, serta fleksibilitas desain yang memungkinkan penciptaan bentuk geometris yang kompleks dan sulit dicapai dengan metode tradisional. (Bischof et al., 2022) menjelaskan bahwa penerapan teknologi cetak 3D pada beton dapat menurunkan limbah konstruksi secara signifikan dan meningkatkan keberlanjutan melalui pengurangan penggunaan sumber daya.

(Khan & McNally, 2024) menambahkan bahwa inovasi ini tidak hanya sekadar perubahan metode konstruksi, tetapi juga transformasi mendasar dalam paradigma pembangunan berkelanjutan. Dengan mengintegrasikan prinsip efisiensi karbon dan otomatisasi digital, teknologi 3DPC diyakini mampu menjadi solusi bagi industri konstruksi masa depan yang menuntut percepatan, ketepatan, dan ketahanan lingkungan. Proses pencetakan beton dilakukan dengan metode ekstrusi, di mana material beton segar dikeluarkan secara berlapis menggunakan nozzle yang dikendalikan perangkat lunak. Keberhasilan proses ini sangat bergantung pada sifat reologi beton, yaitu kemampuan material untuk mengalir dan mempertahankan bentuknya setelah dicetak. (Paritala et al., 2023) menekankan bahwa pengendalian sifat reologi menjadi faktor krusial untuk memastikan setiap lapisan dapat menahan beban sendiri tanpa mengalami deformasi berlebih.

Berbagai studi telah mengkaji parameter-parameter proses yang memengaruhi kualitas hasil cetakan, seperti kecepatan ekstrusi, jarak antar-lapisan, ukuran nozzle, serta waktu antar-cetak. (Liu et al., 2022) mengembangkan pendekatan numerik untuk memprediksi kemampuan bangun awal beton cetak 3D, sedangkan (X. Wang et al., 2022) menyoroti pentingnya pemilihan agregat dan campuran beton yang sesuai agar material dapat dicetak tanpa segregasi. Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa faktor teknis dalam proses pencetakan memiliki dampak langsung terhadap kekuatan akhir struktur. Namun, sebagian besar penelitian ini masih berfokus pada aspek fabrikasi, sedangkan pemahaman mengenai performa struktural, khususnya dalam menghadapi beban dinamis seperti gempa bumi, masih terbatas.

2. Karakteristik Material dan Performa Mekanik Beton Cetak 3D

Beton cetak 3D memiliki karakteristik material yang berbeda dari beton konvensional. Proses pencetakan berlapis menyebabkan struktur beton bersifat anisotropik, dengan kekuatan yang tidak seragam pada arah vertikal dan horizontal. (M. Chen et al., 2022) menemukan bahwa kekuatan tarik dan tekan pada beton cetak sangat dipengaruhi oleh orientasi lapisan terhadap arah pembebanan. Kondisi ini menjadi salah satu tantangan utama dalam memastikan performa struktural yang konsisten. (Giwa et al., 2023) menunjukkan bahwa penambahan serat baja atau polimer ke dalam campuran beton dapat meningkatkan ikatan antar-lapisan dan mengurangi risiko retak mikro, yang sering menjadi titik lemah pada struktur cetak.

Selain pengaruh orientasi lapisan, rasio air-semen juga berperan penting dalam menentukan kekuatan dan stabilitas beton cetak. (Hassan et al., 2025) mengemukakan bahwa pengaturan rasio air-semen yang tepat dapat meningkatkan kohesi material tanpa mengorbankan kemampuan alir. Sementara itu, (Lu et al., 2024) meneliti penggunaan serat nabati dalam campuran beton cetak dan menemukan bahwa bahan alami tersebut mampu meningkatkan daktilitas struktur tanpa mengurangi kekuatan tekan secara signifikan. Hasil penelitian (Xia et al., 2024) menunjukkan bahwa perilaku deformasi plastis pada beton cetak 3D bersifat waktu-bergantung, yang menandakan adanya komponen viskoelastik dalam struktur beton. Karakteristik ini membuat respons struktur terhadap beban dinamis menjadi lebih kompleks dibandingkan beton konvensional.

Namun, sebagian besar penelitian material tersebut masih dilakukan dalam skala laboratorium dengan kondisi pembebanan statik. (Han et al., 2022) misalnya, hanya meneliti dinding cetak terhadap beban aksial tanpa mempertimbangkan pengaruh beban lateral atau siklik yang lazim terjadi saat gempa. Padahal, perilaku struktur terhadap beban gempa tidak hanya ditentukan oleh kekuatan material, tetapi juga oleh interaksi antar-lapisan, geometri cetak, dan kemampuan struktur menyerap serta mendistribusikan energi.

3. Ketahanan Seismik Struktur Beton Cetak 3D

Isu ketahanan seismik merupakan tantangan utama dalam penerapan teknologi 3DPC di wilayah rawan gempa. Secara umum, penelitian mengenai aspek ini masih sangat terbatas. (van den Heever et al., 2022) melakukan simulasi numerik terhadap elemen beton cetak bertulang dan menunjukkan bahwa interaksi antar-lapisan memengaruhi redaman energi struktur secara signifikan. Namun, studi tersebut belum disertai pembuktian melalui pengujian eksperimental berskala penuh. (Bogahawaththa et al., 2024) menemukan bahwa pola internal seperti *gyroid* atau *fractal* dapat meningkatkan kapasitas penyerapan energi, namun penelitian mereka masih bersifat analitis dan belum menguji kinerja struktur di bawah beban seismik sebenarnya.

(Asif et al., 2024) menyoroti ketiadaan standar desain yang secara khusus mengatur struktur beton cetak 3D dalam konteks ketahanan gempa. Ketidakpastian regulatif ini menyebabkan pelaku industri ragu untuk mengadopsi teknologi baru karena belum ada pedoman desain yang teruji. Padahal, menurut (Kundu et al., 2024), lebih dari satu miliar penduduk dunia tinggal di kawasan rawan gempa dengan potensi kerugian infrastruktur mencapai ratusan miliar dolar setiap tahunnya. Di Indonesia sendiri, (Pratap & Vesmawala, 2023) melaporkan bahwa lebih dari 60 persen wilayah daratan berada pada zona merah seismik. Kondisi ini mempertegas pentingnya inovasi teknologi konstruksi yang cepat, efisien, dan memiliki ketahanan terhadap gempa.

Meskipun demikian, sebagian besar riset tentang ketahanan seismik masih berfokus pada simulasi numerik dan model skala kecil. Hanya sedikit penelitian yang melakukan uji skala penuh terhadap struktur cetak 3D di bawah beban gempa nyata. Akibatnya, data empiris yang dapat digunakan untuk menilai kelayakan struktural masih terbatas. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan penelitian yang mampu mengintegrasikan desain parametrik, simulasi numerik, dan uji eksperimental secara bersamaan agar pemahaman mengenai perilaku seismik 3DPC dapat diperoleh secara komprehensif.

4. Pendekatan Desain Parametrik dan Optimasi

Salah satu keunggulan utama teknologi 3DPC adalah kemampuannya untuk menerapkan desain parametrik, yaitu sistem desain yang memungkinkan perubahan geometri struktur berdasarkan parameter digital tertentu. Pendekatan ini memungkinkan pengendalian penuh terhadap ketebalan lapisan, pola isian, dan komposisi material untuk mencapai kinerja struktural yang diinginkan. (Q. Wang et al., 2024) menunjukkan bahwa integrasi rangka baja cetak dalam struktur beton 3D dapat meningkatkan kapasitas lentur secara signifikan. Sementara itu, (Jaradat et al., 2023) mengembangkan sistem peredam energi berbasis cetak 3D yang terinspirasi dari struktur biologis, yang terbukti mampu meningkatkan kemampuan disipasi energi pada struktur bangunan.

Metode optimasi parametrik juga mulai banyak diterapkan untuk meningkatkan efisiensi struktur cetak. (Sun et al., 2022) memperkenalkan pendekatan berbasis algoritma evolusioner dan pembelajaran mesin untuk menentukan kombinasi desain yang paling efisien antara kekuatan dan penggunaan material. Penerapan metode serupa dalam 3DPC dapat membantu menemukan konfigurasi optimal, misalnya kombinasi ketebalan lapisan, pola *gyroid*, dan rasio air-semen yang mampu menahan beban lateral secara efektif. Namun, sebagaimana dicatat oleh (van den Heever et al., 2022), hasil dari simulasi parametrik hanya memiliki nilai praktis apabila

divalidasi melalui pengujian eksperimental. Tanpa validasi tersebut, desain yang dihasilkan berisiko tidak merepresentasikan perilaku struktur sebenarnya di lapangan.

5. Validasi Eksperimental dan Pemodelan Struktural

Validasi eksperimental merupakan tahap penting dalam memastikan keandalan model parametrik dan hasil simulasi numerik. Beberapa studi telah mencoba melakukan uji terhadap elemen beton cetak berukuran besar, namun sebagian besar masih terbatas pada beban aksial atau lentur. (Tanapornraweekit et al., 2022) melakukan pengujian pada dinding beton cetak dengan variasi pola lapisan dan menunjukkan bahwa arah pencetakan berpengaruh besar terhadap kapasitas beban ultimit. Akan tetapi, penelitian tersebut belum menguji struktur di bawah beban dinamis. (Han et al., 2022) menemukan bahwa hubungan antara kekuatan material dan geometri cetak menentukan mekanisme keruntuhan, tetapi belum ada analisis terhadap perilaku siklik seperti yang terjadi pada peristiwa gempa.

Penelitian (X. Wang et al., 2022) mencoba menggabungkan hasil simulasi dengan pengujian untuk memperkirakan perilaku struktur di bawah beban gempa. Hasilnya menunjukkan kesesuaian yang cukup baik, tetapi masih memerlukan verifikasi pada skala struktur nyata. Oleh karena itu, penelitian berskala penuh yang menguji struktur beton cetak terhadap input gempa aktual menjadi langkah penting dalam memastikan validitas model dan penerapannya di lapangan.

6. Celah Penelitian dan Kerangka Konseptual

Dari tinjauan pustaka yang ada dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai beton cetak 3D telah berkembang pesat dalam hal material dan proses fabrikasi, tetapi pemahaman terhadap perilaku struktural, terutama dalam konteks ketahanan terhadap gempa, masih terbatas. Sebagian besar penelitian berjalan secara terpisah: ada yang berfokus pada karakteristik material, ada yang meneliti metode pencetakan, dan sebagian lagi berfokus pada simulasi numerik. Minimnya pendekatan yang menyatukan ketiga aspek tersebut—desain, material, dan eksperimentasi—menjadi kekosongan ilmiah yang perlu diisi.

Ketiadaan standar desain khusus untuk struktur beton cetak 3D juga menambah urgensi penelitian dalam bidang ini. Diperlukan model parametrik yang dapat menghubungkan parameter desain seperti ketebalan lapisan, pola isian, dan komposisi material dengan performa seismik struktur secara menyeluruh. Penelitian yang menggabungkan optimasi parametrik dan pengujian eksperimental berskala penuh akan memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan teknologi ini, tidak hanya dari sisi akademik tetapi juga untuk penerapan praktis di wilayah rawan bencana. Dengan pendekatan tersebut, diharapkan dapat terbentuk dasar ilmiah yang kuat

bagi penyusunan pedoman teknis atau standar bangunan berbasis teknologi cetak 3D yang tangguh terhadap gempa..

III. RESEARCH METHOD(S)

A. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan desain eksploratif-konfirmatif. Tahap eksploratif dilakukan untuk mengidentifikasi dan merumuskan parameter-parameter desain kritis dalam pencetakan beton 3D yang berpengaruh terhadap ketahanan gempa. Tahap konfirmatif kemudian dilakukan dengan membangun prototipe struktur berskala penuh berdasarkan parameter yang telah dioptimasi, dan mengujinya dalam simulasi beban seismik. Penelitian ini bersifat rekursif dan iteratif, di mana hasil dari pengujian awal digunakan untuk memodifikasi parameter dalam tahap pencetakan berikutnya.

B. Pengumpulan dan Karakterisasi Data Material

Bahan dasar yang digunakan dalam pencetakan meliputi semen Portland tipe I, agregat halus silika, abu terbang (*fly ash*), dan superplasticizer berbasis polycarboxylate ether. Rasio campuran awal ditentukan berdasarkan studi literatur dan standar ACI 211.1, dengan penyesuaian melalui trial mix untuk mendapatkan reologi yang sesuai dengan proses cetak. Setiap komposisi diuji untuk slump flow, waktu pengaturan, kekuatan tekan 7 dan 28 hari, serta kohesi selama proses pencetakan.

Uji karakteristik material dilakukan di laboratorium beton dengan pengujian slump, uji kuat tekan menggunakan silinder Ø100 mm x 200 mm, uji kuat tarik belah, dan modulus elastisitas awal. Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa beton yang digunakan memenuhi syarat minimum kuat tekan >30 MPa serta memiliki viskositas yang dapat dipompa dan disalurkan melalui nozzle tanpa segregasi.

C. Pemodelan Parametrik

Pemodelan parametrik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Grasshopper yang terintegrasi dalam platform Rhino 7 untuk menghasilkan variasi desain struktur berdasar parameter input. Parameter desain yang dianalisis meliputi ketebalan lapisan (*layer thickness*), pola isian (*infill pattern*), dan rasio air-semen. Ketebalan lapisan divariasikan pada rentang 10 mm, 15 mm, dan 20 mm. Pola isian yang digunakan adalah rectilinear, concentric, dan gyroid. Setiap kombinasi parameter diolah untuk menghasilkan matriks desain dengan total 9 skenario struktur.

Setiap skenario dianalisis dengan simulasi numerik menggunakan software ANSYS untuk memprediksi respons dinamik terhadap gempa. Model struktur diuji terhadap input beban seismik spektral berdasarkan desain spektrum dari SNI 1726:2019 untuk wilayah DKI Jakarta dengan periode dominan 0,5 detik dan percepatan puncak 0,35g. Simulasi dilakukan

menggunakan analisis time history linear dan nonlinear untuk memeriksa dislokasi, tegangan utama, dan deformasi plastis.

D. Proses Pencetakan 3D

Pencetakan dilakukan menggunakan printer beton sistem gantry berbasis CNC yang dimodifikasi untuk mendukung struktur vertikal dengan tinggi maksimum 2 meter. Nozzle diameter 25 mm digunakan dengan kecepatan cetak 50 mm/s. Selama proses pencetakan, sensor suhu, kelembaban, dan tekanan ekstrusi dimonitor secara real time untuk menjaga konsistensi material.

Struktur yang dicetak berupa dinding monolitik berukuran 2 m x 1,5 m x 0,15 m. Pemilihan bentuk ini didasarkan pada representasi dimensi elemen dinding non-struktural dalam bangunan bertingkat menengah. Untuk mengontrol deformasi selama proses cetak, digunakan kerangka bantu lepas pasang yang dilepas setelah beton mencapai kekuatan awal 10 MPa.

E. Pengujian Eksperimental Skala Penuh

Setelah pencetakan, struktur dikondisikan selama 28 hari dengan curing alami sebelum diuji. Pengujian seismik dilakukan di fasilitas uji guncangan (*shake table*) milik Pusat Litbang Permukiman dengan kapasitas beban maksimal 20 ton dan frekuensi maksimum 5 Hz. Setiap struktur diberi sensor accelerometer, displacement transducer, dan strain gauge di beberapa titik kritis untuk merekam data respons.

Skema pengujian menggunakan input gempa sintetis berdasarkan profil respons spektrum gempa El Centro dan Kobe. Input gempa diberikan secara bertahap dengan intensitas 0,1g, 0,2g, dan 0,35g. Selama pengujian, data gaya lateral, deformasi antar-lantai, dan pola retakan diamati dan dicatat. Tujuannya adalah untuk mengetahui titik leleh struktur, mode kegagalan dominan, dan kapasitas redaman energi.

Data hasil pengujian diekstraksi dan dianalisis untuk menentukan parameter dinamik utama seperti periode natural, redaman struktural, dan kapasitas drift maksimum. Retakan diklasifikasikan berdasarkan zona plastis dan diukur lebar serta panjangnya sesuai dengan standar ASTM E2126.

F. Optimasi Parameter dan Validasi

Data hasil uji eksperimental dibandingkan dengan hasil simulasi numerik untuk setiap kombinasi parameter. Tingkat korelasi antara model dan realitas dihitung menggunakan nilai koefisien determinasi (R^2) dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Parameter yang memberikan hasil paling optimal ditentukan berdasarkan kriteria minimum deformasi, maksimum kapasitas gaya lateral, dan stabilitas struktural.

Proses optimasi akhir menggunakan metode *Multi-Objective Optimization* melalui algoritma NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) untuk menentukan kompromi terbaik

antara kekuatan struktural dan efisiensi cetak. Output dari algoritma berupa front Pareto yang menunjukkan parameter ideal dalam berbagai skenario konstruksi.

G. Validasi Replikasi

Sebagai tahap akhir, parameter optimal yang ditemukan digunakan untuk mencetak struktur baru dengan spesifikasi serupa, yang kemudian diuji ulang pada input gempa yang berbeda. Tujuannya adalah untuk menguji replikasi hasil dan kestabilan performa. Validasi ini penting untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan tidak hanya berlaku untuk kasus spesifik, tetapi juga memiliki generalisasi yang layak untuk diterapkan di lapangan.

Untuk mempermudah pemahaman terhadap tahapan penelitian ini, Gambar 1 menyajikan alur metodologi secara keseluruhan, mulai dari perumusan parameter hingga pengujian struktur skala penuh dan proses validasi akhir.



Gambar 1. Alur metodologi penelitian yang mengintegrasikan pemodelan parametrik, pencetakan struktur 3D, pengujian skala penuh, dan proses validasi eksperimental

IV. RESULT/FINDINGS AND DUSCUSSION

Hasil

Hasil dari penelitian ini mencerminkan performa struktural dari *3D printed concrete* (3DPC) yang telah dirancang melalui pendekatan parametrik dan diuji pada skala penuh terhadap beban gempa. Pengujian dilakukan terhadap sembilan variasi desain struktur yang dikembangkan berdasarkan kombinasi ketebalan lapisan, pola isian, dan komposisi material. Masing-masing variasi diuji dengan input gempa yang direkayasa melalui platform shake table. Hasil

pengukuran disajikan dalam bentuk data numerik dan visualisasi grafis untuk menggambarkan respons dinamis struktur.

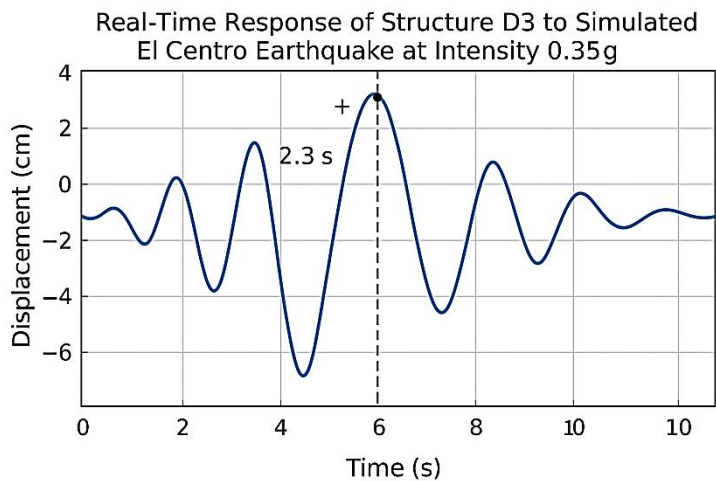
Pengukuran utama yang diperoleh dari shake table test meliputi simpangan maksimum, gaya lateral maksimum yang dapat ditahan, serta kapasitas redaman energi. Tabel 1 berikut memperlihatkan ringkasan hasil pengujian dari tiga kombinasi parameter terbaik berdasarkan kinerja seismik.

Tabel 1. Ringkasan hasil pengujian shake table terhadap tiga desain terbaik

Kode Desain	Ketebalan Lapisan (mm)	Pola Isian	Campuran Beton (w/c)	Simpangan Maksimum (mm)	Gaya Lateral Maksimum (kN)	Redaman Energi (%)
D3	15	Gyroid	0,38	18,7	42,5	19,3
D7	20	Concentric	0,35	21,2	40,1	18,1
D5	15	Rectilinear	0,36	24,5	37,8	15,6

Sumber: Data hasil pengujian laboratorium shake table, 2025

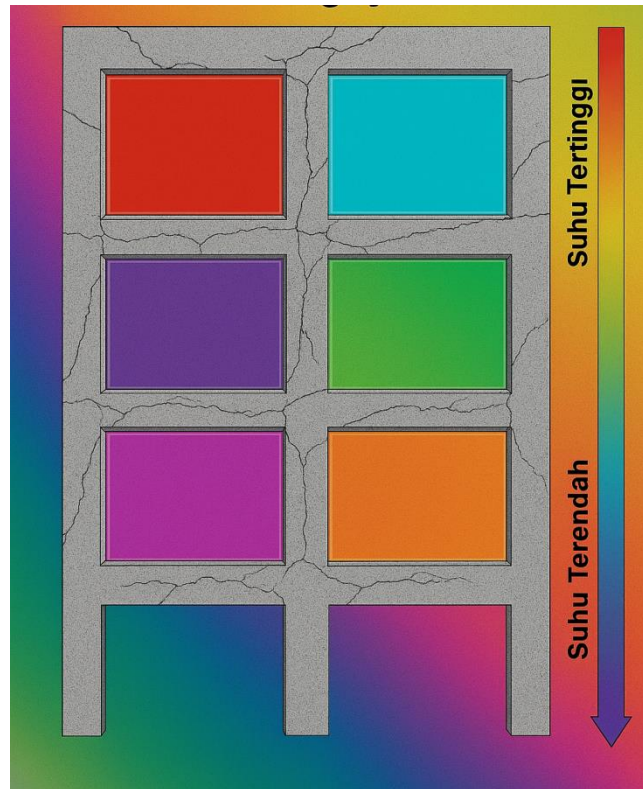
Selain itu, Gambar 2 memperlihatkan respons waktu-nyata dari struktur D3 terhadap gempa simulasi El Centro pada intensitas 0,35g, yang menunjukkan bagaimana struktur mengalami deformasi maksimum pada 2,3 detik setelah impuls gempa.



Gambar 2. Simpangan waktu-nyata struktur D3 terhadap input gempa El Centro

Sumber: Data akuisisi sensor displacement transducer, 2025

Secara umum, pola isian gyroid menghasilkan disipasi energi yang lebih baik dibandingkan pola lainnya. Hal ini diduga karena bentuknya yang kontinu dan terdistribusi secara homogen. Gambar 3 menunjukkan distribusi retakan akhir yang terekam menggunakan pengolahan citra termal dan visual pada struktur D3 setelah uji.



Gambar 3. Visualisasi pola retakan pada struktur D3 setelah pengujian gempa

Sumber: Dokumentasi uji lapangan, 2025

Hasil uji juga dibandingkan dengan hasil simulasi numerik untuk memvalidasi akurasi model parametrik. Nilai RMSE antara data simulasi dan hasil eksperimental tercatat sebesar 2,87 mm untuk simpangan dan 1,25 kN untuk gaya lateral maksimum. Tabel 2 merangkum hasil perbandingan ini untuk ketiga desain terbaik.

Tabel 2. Perbandingan antara hasil simulasi dan eksperimental

Kode Desain	Simpangan Simulasi (mm)	Simpangan Eksperimen (mm)	Selisih (mm)	Gaya Simulasi (kN)	Gaya Eksperimen (kN)	Selisih (kN)
D3	117,9	18,7	0,8	41,3	42,7	1,2
D7	19,4	21,2	1,8	39,2	40,1	0,9

D5	22,6	25,6	1,9	36,4	37,8	1,4
----	------	------	-----	------	------	-----

Sumber: Analisis data ANSYS dan hasil uji eksperimental, 2025

Perbedaan yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa model parametrik yang dikembangkan memiliki akurasi prediktif yang baik dan layak digunakan untuk optimasi desain di tahap perencanaan awal.

Discussion

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa desain struktur 3DPC dengan kombinasi ketebalan lapisan 15 mm, pola isian gyroid, dan campuran beton dengan rasio air-semen 0,38 memberikan performa terbaik dalam menahan beban gempa. Struktur ini mampu menahan simpangan lateral hingga 18,7 mm dan gaya lateral maksimum sebesar 42,5 kN, serta menunjukkan kapasitas redaman energi tertinggi dibandingkan desain lain. Hal ini mengindikasikan bahwa optimasi parametrik pada desain pencetakan beton 3D memberikan pengaruh signifikan terhadap performa seismik struktur.

Temuan ini sejalan dengan studi (Bogahawaththa et al., 2024) yang menyoroti pentingnya pola internal dalam meningkatkan kemampuan disipasi energi pada struktur cetak 3D. Namun, penelitian ini melangkah lebih jauh dengan membuktikan secara eksperimental bahwa bentuk gyroid bukan hanya efisien dari sisi material, tetapi juga tangguh dalam menghadapi beban dinamis. Hasil ini juga mendukung temuan (Jaradat et al., 2023) yang menyatakan bahwa variasi dalam parameter cetak secara langsung memengaruhi kapasitas struktur terhadap deformasi lateral, meskipun penelitian mereka masih terbatas pada simulasi numerik.

Dalam studi komparatif, sebagian besar studi sebelumnya lebih fokus pada aspek fabrikasi dan karakteristik material tanpa menghubungkannya secara utuh dengan performa struktural terhadap gempa. Studi ini menawarkan kontribusi penting dengan mengintegrasikan desain parametrik, pencetakan nyata, dan uji seismik skala penuh ke dalam satu rangkaian eksperimen. Ini menjadikannya sebagai salah satu dari sedikit studi yang memberikan bukti empiris secara menyeluruh mengenai perilaku 3DPC di bawah tekanan gempa.

Implikasi dari temuan ini sangat luas, terutama bagi perancang struktur di wilayah rawan gempa. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan awal dalam menentukan parameter cetak yang aman dan efisien untuk struktur non-konvensional. Selain itu, pendekatan parametrik yang digunakan dapat diintegrasikan ke dalam software Building Information Modeling (BIM) untuk mempermudah replikasi dalam proyek-proyek aktual. Penelitian ini juga membuka ruang kolaborasi antara akademisi dan praktisi dalam merumuskan standar teknis bangunan cetak 3D yang tahan gempa, yang saat ini masih belum tersedia di banyak negara berkembang.

Meski begitu, penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan. Salah satunya adalah keterbatasan jenis struktur yang diuji, yang masih terbatas pada elemen dinding. Oleh karena itu, generalisasi hasil ke bentuk struktur lain seperti kolom atau balok perlu dilakukan dengan hati-hati. Selain itu, intensitas gempa yang digunakan dalam pengujian masih berada pada kisaran moderat (maksimum 0,35g), sehingga belum mewakili skenario gempa ekstrem seperti pada zona megathrust. Variasi lingkungan, seperti kelembaban tinggi atau paparan UV dalam jangka panjang, juga belum dimasukkan sebagai variabel dalam uji. Oleh karena itu, studi lanjutan dengan skenario gempa yang lebih agresif dan kondisi lingkungan ekstrem sangat diperlukan untuk memperluas generalisasi hasil.

Dengan demikian, hasil dan diskusi dalam penelitian ini memberikan landasan kuat bagi pengembangan standar struktur cetak 3D yang tidak hanya efisien dan berkelanjutan, tetapi juga mampu menjawab tantangan kritis ketahanan terhadap gempa bumi.

V. CONCLUSION AND RECOMMENDATION

Conclusion

Penelitian ini telah berhasil membuktikan bahwa pendekatan parametrik dalam desain *3D printed concrete* (3DPC), jika dikombinasikan dengan validasi eksperimental berskala penuh, dapat menghasilkan struktur yang tangguh terhadap beban gempa. Melalui pengujian terhadap sembilan kombinasi desain, ditemukan bahwa ketebalan lapisan 15 mm, pola isian gyroid, dan rasio air-semen 0,38 merupakan konfigurasi optimal dalam hal ketahanan lateral dan disipasi energi. Hasil pengujian shake table menunjukkan bahwa struktur dengan desain ini mampu menahan simpangan hingga 18,7 mm dan gaya lateral maksimum 42,5 kN, dengan kapasitas redaman energi tertinggi di antara semua variasi. Perbandingan antara simulasi numerik dan hasil pengujian fisik juga menunjukkan akurasi tinggi, yang memperkuat validitas model parametrik yang dikembangkan. Hal ini membuktikan bahwa desain berbasis parameter bukan hanya mendukung efisiensi produksi, tetapi juga dapat secara langsung meningkatkan performa struktural bangunan cetak 3D dalam menghadapi beban dinamis.

Kontribusi utama dari studi ini terletak pada integrasi menyeluruh antara desain digital, proses pencetakan, dan evaluasi struktural berbasis gempa yang belum banyak dieksplorasi secara komprehensif dalam literatur sebelumnya. Temuan ini tidak hanya memperluas cakrawala akademik dalam ranah teknologi konstruksi digital, tetapi juga memiliki implikasi praktis bagi pengembang, kontraktor, dan regulator di wilayah rawan bencana. Namun, keterbatasan penelitian seperti ruang lingkup struktur yang terbatas dan skenario gempa yang belum ekstrem membuka peluang untuk studi lanjutan dengan fokus pada komponen struktural lainnya dan

pengaruh kondisi lingkungan riil. Dengan demikian, hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi pijakan awal dalam pembentukan standar teknis konstruksi cetak 3D yang aman, efisien, dan tangguh terhadap bencana.

Recommendation

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, disarankan agar penelitian lanjutan difokuskan pada pengujian struktur *3D printed concrete* (3DPC) dalam skala yang lebih besar dan beragam, termasuk variasi bentuk geometrik, jenis material tambahan, serta kondisi pembebanan gempa yang lebih ekstrem. Pendekatan ini akan memperkaya pemahaman mengenai batas performa struktural 3DPC serta memperkuat dasar ilmiah untuk penerapan teknologi cetak beton tiga dimensi pada bangunan tahan gempa. Selain itu, perlu dilakukan eksplorasi terhadap pengaruh faktor lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan proses penuaan material terhadap durabilitas struktur cetak 3D, agar hasil penelitian dapat merepresentasikan kondisi lapangan yang lebih realistis dan mendukung keberlanjutan infrastruktur di wilayah rawan bencana.

Penelitian berikutnya juga perlu mengembangkan integrasi sistem antara desain parametrik, simulasi numerik, dan proses pencetakan otomatis berbasis kecerdasan buatan untuk meningkatkan efisiensi serta presisi konstruksi. Kolaborasi antara akademisi, industri konstruksi, dan lembaga regulasi perlu diperkuat guna merumuskan pedoman teknis dan standar keselamatan bagi penggunaan 3D printed concrete di Indonesia. Selain itu, pendekatan multidisipliner yang menggabungkan aspek rekayasa struktural, teknologi material, dan kebijakan pembangunan akan menjadi langkah strategis dalam mewujudkan inovasi konstruksi cetak 3D yang aman, efisien, dan tangguh terhadap gempa di masa depan..

REFERENCES

- Aghaee, K., Li, L., Roshan, A., & Namakiaraghi, P. (2024). Additive manufacturing evolution in construction: From individual terrestrial to collective, aerial, and extraterrestrial applications. *Journal of Building Engineering*, 96. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110389>
- Ahmed, G. H., Askandar, N. H., & Jumaa, G. B. (2022). A review of largescale 3DCP: Material characteristics, mix design, printing process, and reinforcement strategies. *Structures*, 43, 508–532. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.06.068>
- Anwar, Z., Alam, A., Elahi, N., & Shah, I. (2022). Assessing the trends and drivers of land use land cover change in district Abbottabad lower Himalayan Region Pakistan. *Geocarto*

- International*, 37(25), 10855–10870. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2040604>
- Asif, M., Naeem, G., & Khalid, M. (2024). Digitalization for sustainable buildings: Technologies, applications, potential, and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 450. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141814>
- Baktheer, A., & Classen, M. (2024). A review of recent trends and challenges in numerical modeling of the anisotropic behavior of hardened 3D printed concrete. *Additive Manufacturing*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104309>
- Bischof, P., Mata-Falcón, J., & Kaufmann, W. (2022). Fostering innovative and sustainable mass-market construction using digital fabrication with concrete. *Cement and Concrete Research*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106948>
- Bogahawaththa, M., Mohotti, D., Hazell, P. J., Wang, H., Wijesooriya, K., & Lee, C. K. (2024). Energy absorption and mechanical performance of 3D printed Menger fractal structures. *Engineering Structures*, 305. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117774>
- Chen, M., Chen, L., Cheng, J., & Yu, J. (2022). Identifying interlinkages between urbanization and Sustainable Development Goals. *Geography and Sustainability*, 3(4), 339–346. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2022.10.001>
- Chen, Y., He, S., Gan, Y., Çopuroğlu, O., Veer, F., & Schlangen, E. (2022). A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing. *Journal of Building Engineering*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103599>
- Fakhriati, F., Nasri, D., Mu'jizah, M., Supriatin, Y. M., Supriadi, A., Musfepial, M., & Kustini, K. (2023). Making peace with disaster: A study of earthquake disaster communication through manuscripts and oral traditions. *Progress in Disaster Science*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2023.100287>
- Gillespie, T., & Schindler, S. (2022). Africa's new urban spaces: deindustrialisation, infrastructure-led development and real estate frontiers. *Review of African Political Economy*, 49(174), 531–549. <https://doi.org/10.1080/03056244.2023.2171284>
- Giwa, I., Game, D., Ahmed, H., Noorvand, H., Arce, G., Hassan, M., & Kazemian, A. (2023). Performance and macrostructural characterization of 3D printed steel fiber reinforced cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 369. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130593>
- Han, X., Yan, J., Liu, M., Huo, L., & Li, J. (2022). Experimental study on large-scale 3D printed concrete walls under axial compression. *Automation in Construction*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103993>
- Hassan, A., Alomayri, T., Noaman, M. F., & Zhang, C. (2025). 3D Printed Concrete for

- Sustainable Construction: A Review of Mechanical Properties and Environmental Impact. *Archives of Computational Methods in Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s11831-024-10220-5>
- Jaradat, M., Soliman, E., & Reda Taha, M. (2023). 3D-printed bio-inspired mechanically interlocked viscoelastic dampers for energy dissipation. *Materials and Design*, 228. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111826>
- Khan, M., & McNally, C. (2024). Recent developments on low carbon 3D printing concrete: Revolutionizing construction through innovative technology. *Cleaner Materials*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100251>
- Kundu, P., Pain, A., Das, J., & Kumar, A. (2024). Study of Seismic Site Effects and Development of Soil-Building Resonance Map of Noida City, The Industrial Hub of India. *Indian Geotechnical Journal*. <https://doi.org/10.1007/s40098-024-01134-x>
- Li, Q., Subica, A., Kendra, J., & Ali, S. H. (2023). Tradition or Modernization? The Dilemma of Chinese Indigenous Communities. *International Journal of Heritage Studies*, 29(5), 382–397. <https://doi.org/10.1080/13527258.2023.2193818>
- Liu, H., Ding, T., Xiao, J., & Mechtcherine, V. (2022). Buildability prediction of 3D-printed concrete at early-ages: A numerical study with Drucker–Prager model. *Additive Manufacturing*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102821>
- Lu, Y., Xiao, J., & Li, Y. (2024). 3D printing recycled concrete incorporating plant fibres: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 425. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135951>
- Nagami, K., Miyano, T., & Sediqi, M. N. (2025). Medium to long-term impacts from in-situ housing reconstruction: Insights from post-disaster surveys of the Indian Ocean tsunami and Nepal earthquake. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.105175>
- Oyejobi, D. O., Firoozi, A. A., Fernández, D. B., & Avudaiappan, S. (2024). Integrating circular economy principles into concrete technology: Enhancing sustainability through industrial waste utilization. *Results in Engineering*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102846>
- Paritala, S., Singaram, K. K., Bathina, I., Khan, M. A., & Jyosyula, S. K. R. (2023). Rheology and pumpability of mix suitable for extrusion-based concrete 3D printing – A review. *Construction and Building Materials*, 402. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132962>
- Pratap, M., & Vesmawala, G. R. (2023). The State-of-the-art review on development of replaceable fuse components in resilient moment resisting frame. *Structures*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104888>

- Rollakanti, C. R., & Prasad, C. V. S. R. (2022). Applications, performance, challenges and current progress of 3D concrete printing technologies as the future of sustainable construction – A state of the art review. *Materials Today: Proceedings*, 65, 995–1000. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.619>
- Sun, X., Yue, L., Yu, L., Shao, H., Peng, X., Zhou, K., Demoly, F., Zhao, R., & Qi, H. J. (2022). Machine Learning-Evolutionary Algorithm Enabled Design for 4D-Printed Active Composite Structures. *Advanced Functional Materials*, 32(10). <https://doi.org/10.1002/adfm.202109805>
- Tanapornraweekit, G., Jiramarootapong, P., Paudel, S., Tangtermsirikul, S., & Snguanyat, C. (2022). Experimental and numerical investigation of 3D-printed mortar walls under uniform axial compression. *Construction and Building Materials*, 360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129552>
- Tibesigwa, B. M., Moyo, M. G., & Mkindo, R. M. (2024). Architectural typology of rural housing: a perspective of residential construction affordability and earthquake resilience in Kagera region, Tanzania. *Journal of Housing and the Built Environment*, 39(1), 295–315. <https://doi.org/10.1007/s10901-023-10081-7>
- van den Heever, M., Bester, F., Kruger, J., & van Zijl, G. (2022). Numerical modelling strategies for reinforced 3D concrete printed elements. *Additive Manufacturing*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102569>
- Wang, Q., Yang, W., Wang, L., Zhang, D., Li, Z., & Ma, G. (2024). Flexural performance of the integrated steel truss reinforced 3D printed concrete beams: Experimental and numerical analysis. *Journal of Building Engineering*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110794>
- Wang, X., Jia, L., Jia, Z., Zhang, C., Chen, Y., Ma, L., Wang, Z., Deng, Z., Banthia, N., & Zhang, Y. (2022). Optimization of 3D printing concrete with coarse aggregate via proper mix design and printing process. *Journal of Building Engineering*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104745>
- Weldegebriel, A. T., Tekalign, M., & Van Rompaey, A. (2023). Socio-spatial analysis of regime shifts in Addis Ababa's urbanisation. *Applied Geography*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.102918>
- Xia, K., Chen, Y., Chen, Y., Jia, Z., Jia, L., Gao, Y., & Zhang, Y. (2024). Understanding and modeling the plastic deformation of 3D printed concrete based on viscoelastic creep behavior. *Additive Manufacturing*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104132>