

ULTRA-HIGH-PERFORMANCE CONCRETE (UHPC): TINJAUAN ARSITEKTURAL DALAM RANCANGAN STRUKTURAL

Luluk Kristanto

Prodi Teknik Sipil Pertahanan, Akademi Militer, Jl. Gatot Subroto No. 1 Magelang
Jawa Tengah

lulukkrstanto@niksipilhan.akmil.ac.id

ABSTRAK

Peningkatan tekanan signifikan pada planet kita saat ini yang meliputi populasi penduduk, beban infrastruktur dan bencana, menjadi momentum pengembangan infrastruktur yang lebih ramah lingkungan, berkelanjutan, dan tangguh. UHPC arsitektur telah dikembangkan dalam mendukung kinerja struktural suatu bangunan dengan tetap menjaga aspek penting arsitektural. Teknik studi literatur digunakan untuk membahas tujuan penelitian berupa solusi fasad eksterior, performa dan ketahanan, serta efisiensi dan keberlanjutan. Rancangan eksterior pembentuk arsitektural dari UHPC Arsitektur menjadi lebih inovatif dan kreatif khususnya dalam menghasilkan tekstur, bentuk dengan presisi tinggi serta memungkinkan tata letak dan desain interior yang lebih fleksibel dengan penampilan estetis. Kuat tekan UHPC arsitektural, masuk dalam celah antara UHPC dan HPC, serta dapat memberikan kontribusi ketahanan yang unggul dalam rancangan struktural. Diluar harga satuan yang mahal, UHPC Arsitektur berpotensi menghasilkan integrasi solusi kinerja lebih tinggi, material yang lebih sedikit dan mengurangi dampak lingkungan.

Kata-kunci: arsitektural; performa; struktural; uhpc

ABSTRACT

The significant increase in pressure on our planet today, including population, infrastructure load and disasters, has become a momentum for the development of more environmentally friendly, sustainable and resilient infrastructure. Architectural UHPC has been developed to support the structural performance of a building while maintaining important architectural aspects. Literature study techniques are used to discuss research objectives in the form of exterior facade solutions, performance and durability, and efficiency and sustainability. The architectural exterior design of Architectural UHPC becomes more innovative and creative, especially in producing textures, shapes with high precision and allowing for more flexible interior layouts and designs with aesthetic appearance. Performance and Durability. The compressive strength of architectural UHPC, falls into the gap between UHPC and HPC, and can provide a superior resistance contributions in structural design. Outside of the expensive unit price, architectural UHPC has the potential to produce higher performance solution integration, less material and reduced environmental impact.

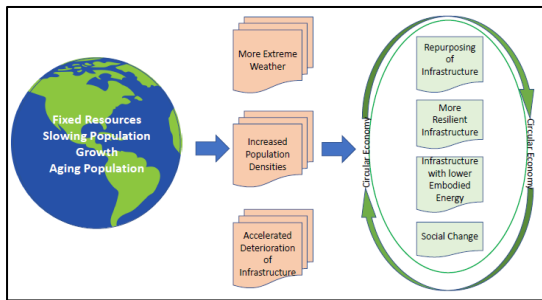
Keywords: architectural; performance; structural; uhpc

PENDAHULUAN

Peningkatan tekanan signifikan pada planet kita saat ini dimana populasi penduduk, beban infrastruktur dan bencana, mendorong makin menipisnya sumber daya alam

disertai cuaca ekstrim diluar prediksi. Di sisi lain, hal ini menjadi momentum yang besar untuk mengembangkan infrastruktur yang lebih ramah lingkungan, berkelanjutan, dan tangguh mengingat tingginya inovasi

teknologi khususnya dibidang konstruksi (**Gambar 1**) (Perry, 2023).

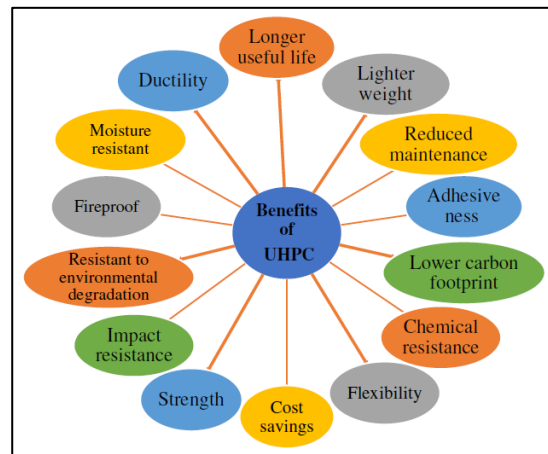


Gambar 1. Tren Global; Tantangan & Perubahan untuk Beradaptasi
(Sumber: Perry, 2023)

Kinerja beton sebagai salah satu komponen struktural utama infrastruktur, sejak 1985, diteliti dan dikembangkan hingga mencapai kinerja yang sangat tinggi. *Ultra High Performance Concrete (UHPC)* dengan sifat mekanik dan ketahanan yang jauh lebih unggul dibandingkan beton konvensional, akhir-akhir ini, penggunaannya telah berkembang baik dalam aplikasi sipil maupun arsitektur (Morcoux, et.al., 2024; Kodeboyina, 2023; Amran, et.al., 2022).

Selama dua dekade terakhir, UHPC telah diaplikasikan pada beberapa komponen infrastruktur sipil dan militer, perbaikan dan restorasi, hingga fitur-fitur dalam arsitektural seperti selubung/penutup memanfaatkan keunggulan ketebalan yang sangat tipis dalam desain rumit yang cukup sulit dicapai dengan beton konvensional (Kodeboyina, 2023; Amran, et.al., 2022; Fang, 2021). Penerapan teknologi material baru sejak 2015, memunculkan peningkatan persaingan dan inovasi dalam mengoptimalkan jumlah pasokan dan biaya material. Namun, keunggulan UHPC (**Gambar 2**) memberikan manfaat tersendiri dan alasan yang kuat bagi calon pengguna (Perry, 2023). Seiring berjalannya

waktu, UHPC memenuhi impian para insinyur dan arsitek untuk benar-benar bermain dengan bentuk dan mencapai struktur yang ramping (Kodeboyina, 2023).



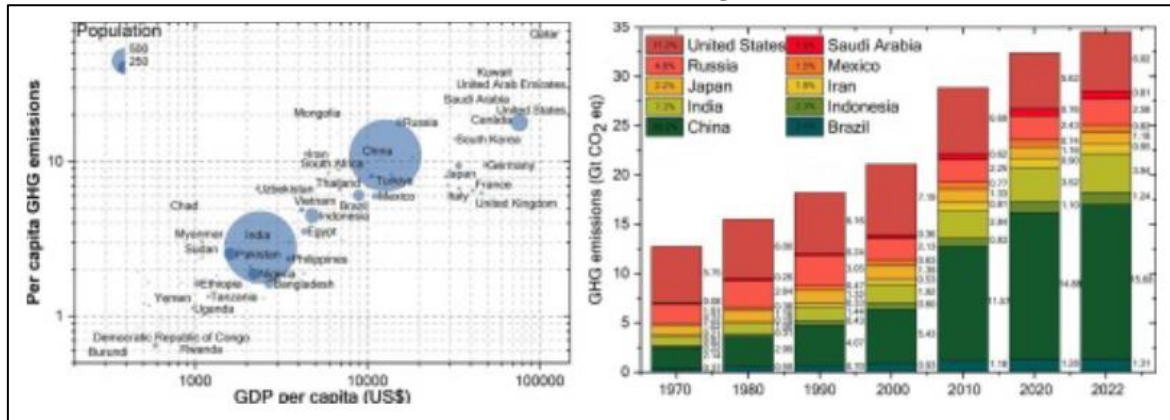
Gambar 2. Keunggulan UHPC
(Sumber: Amran, et.al., 2022)

Meskipun UHPC memiliki fitur-fitur yang cukup baik dalam aplikasi arsitektur, untuk mencapai kompleksitas dan presisi dalam mewujudkan kinerja dan estetika, masih memerlukan evaluasi sifat mekanik dan analisis struktural fasad guna menciptakan kondisi yang ideal, dalam wujud kolaborasi lebih lanjut antara produsen dan regulasi terkait (Bianchi, 2018).

Pada bangunan tertentu, UHPC dapat berkontribusi pada penurunan emisi gas rumah kaca dan membantu memerangi perubahan iklim (Nilimaa, 2023). Berkaitan dengan perubahan iklim, hasil penelitian terhadap kontribusi negara-negara terkemuka dalam menyumbang emisi gas rumah kaca (Greenhouse Gas (GHG)). Gambaran umum emisi GHG secara global dari tahun 1970 hingga 2022 (**Gambar 3**) dimana negara-negara dengan polusi tertinggi di dunia yakni Amerika Serikat, Tiongkok, India, Rusia, Brasil, Indonesia, Jepang, Iran, Meksiko, dan Arab Saudi. Negara-

negara tersebut secara kolektif menyumbang sekitar 64% emisi GHG (Filonchyk, et.al., 2024).

dapat mendorong pengurangan ukuran pondasi dan ukuran rangka struktural utama di sekeliling bangunan, serta memberikan



Gambar 3. Kontribusi Global Emisi GHG
(Sumber: Filonchyk, et.al., 2024)

Produksi semen berkontribusi sekitar 7–8% emisi CO₂ global akibat proses intensif energi dalam produksi klinker sebagai komponen utama semen (Bahmani, 2024). Disisi lain, untuk mencapai kinerja yang sangat tinggi, komposisi UHPC memakai banyak semen dan bahan baku lainnya, yang mengeluarkan 0,68–0,85 ton CO₂ per meter kubik material (Wang, et.al., 2024; Sun, et.al., 2023; Zhang, et.al., 2022).

Perkembangan UHPC yang maju memungkinkan para desainer dan arsitek untuk memperkenalkan beberapa desain dan solusi rekayasa seperti fasad berlubang struktural dan dekoratif dalam gaya kisi atau desain jaring (Amran, et.al., 2022).

Kerugian beton konvensional untuk aplikasi arsitektur adalah ketebalan elemennya, yang disebabkan oleh penutup beton yang diperlukan untuk melindungi tulangan baja dari korosi. Hal ini membuat elemen menjadi sangat berat dan tebal (Iskandar, et.al., 2025; Reeves, 2023; Bianchi, 2018).

Metode pemilihan material yang baik seperti pengurangan bobot fasad

kontribusi positif dalam manajemen konstruksi di lapangan (Naseer, et.al., 2024; TAKTL, 2016).

Kandungan semen tinggi di UHPC merupakan kontributor signifikan terhadap dampak lingkungannya, khususnya dalam hal emisi gas rumah kaca (Bahmani, 2024). Proporsi campuran UHPC dengan emisi karbon terendah yang memenuhi persyaratan rekayasa dapat diperoleh dengan membuat model prediksi kinerja, dengan indikator kinerja emisi karbon sebagai tujuan optimasi (Wang, et.al., 2024).

METODE

Teknik studi literatur digunakan dalam penelitian ini guna membahas tinjauan arsitektural UHPC dalam rancangan struktural UHPC seiring dengan meningkatnya inovasi teknologi konstruksi dalam mengadopsi teknologi fasad arsitektur serta mendukung rancangan struktural didalamnya. Pembahasan dalam penelitian ini membatasi pada solusi fasad eksterior, performa dan ketahanan, serta efisiensi dan keberlanjutan.

PEMBAHASAN

Seiring dengan kompleksitas tujuan pembangunan infrastruktur, pemanfaatan beberapa teknologi diterapkan guna mendukung formulasi penciptaan UHPC dalam memenuhi kebutuhan desain, struktural, dan arsitektur (Morcous, et.al., 2024; Kodeboyina, 2023; Amran, et.al., 2022), termasuk untuk mengembangkan infrastruktur yang lebih ramah lingkungan, berkelanjutan, dan tangguh (Perry, 2023), tanpa meninggalkan aspek fleksibel dan estetik bangunan.

Disisi lain, penerapan teknologi pintar yang didesain dalam kombinasi struktural dan arsitektural bangunan turut menghasilkan penghematan jangka panjang serta peningkatan yang keberlanjutan (Tabibi, 2024). Integrasi teknologi pintar yang tersemat telah terbukti dalam memberikan ketahanan yang adaptif terhadap perawatan bangunan maupun bencana, dimana teknologi ini menawarkan pemantauan *real-time*, sistem peringatan dini, dan mekanisme respons yang efisien (Tabibi, 2024; Shotwell, 2024).

Solusi Fasade Eksterior

Pada masa lampau dalam upaya menciptakan fasad tipis, desainer arsitektur berupaya menghindari penggunaan sistem pelapis sintetis atau logam. Penciptaan UHPC merupakan solusi baru bagi desainer arsitektur untuk diaplikasikan sebagai sistem pelapis, yakni datar maupun lengkung, tipis, ringan, dan kemudahan dalam pemasangan (Tayeh, et.al., 2022).

Kombinasi sifat-sifat unggul dari material UHPC memudahkan kemampuan dalam merancang

bentuk-bentuk yang tipis (Amran, et.al., 2022; Kodeboyina, 2023), multipleks, lengkungan, dan tekstur yang dapat disesuaikan untuk aplikasi sulit yang tidak mungkin dicapai dengan elemen-elemen beton bertulang konvensional. Hal ini dikarenakan sifat-sifat plastis dan keras UHPC, ditambah dengan penghapusan tulangan. Pada kondisi pra-cor dapat mencapai bentuk-bentuk kompleks yang tahan lama dan hemat biaya, serta memerlukan sedikit perawatan (Amran, et.al., 2022; Garg, 2015).

Pada dasarnya, kekuatan tinggi UHPC berasal dari struktur mikro yang padat, yang merupakan hasil penambahan partikel halus (lebih rendah dari 5 mm) dan pengurangan rasio air sebagai pengikat (kisaran 0,18 hingga 0,35). Faktor inilah yang memberikan permukaan yang berkualitas tinggi sangat halus hingga bertekstur rumit. Kombinasi kekuatan, daya tahan, dan rentang estetika UHPC arsitektur yang tinggi akan memungkinkan arsitek untuk membuat fasad secara halus (dramatis) dalam berbagai aplikasi arsitektur (Morcous, et.al., 2024; Bianchi, 2018).

Rancangan selubung eksterior pembentuk arsitektural menjadi lebih inovatif dan kreatif yakni dalam menghasilkan tekstur, bentuk dengan presisi tinggi dan dapat diproduksi dalam berbagai warna yang tahan lama (Amran, et.al., 2022; Garg, 2015), seperti fasad berlubang dekoratif untuk struktural dengan gaya desain jala atau kisi, panel tipis dan ringan dengan luas permukaan yang besar dan tingkat perforasi melebihi 50%, maupun fasad multi bentuk dengan tekstur komposit (Amran, et.al., 2022; Garg, 2015). Salah satu penerapan yang pernah dilakukan yakni pada

Lewis Farms Fire Station, Edmonton, Canada, dimana pada bangunan tersebut menggunakan panel pelapis UHPC sebagai solusi yang tepat dan inovatif (Tayeh, et.al., 2022).

Proses finishing dan curing UHP memegang peranan penting dalam mutu karena unsur plastisnya yang tinggi. Sehingga perlu diperhitungkan desain cetakan yang akurat, guna mempertimbangkan setiap potensi cacat dan penyusutan awal UHPC terhadap kualitas warna agar tahan lama, kemurnian garis, kehalusan, peningkatan tekstur dan bias mineral (Garg, 2015).

Desain Fleksibel dan Estetis

Sejak awal pengembangan UHPC, para arsitek mulai menerapkan bentuk-bentuk yang ikonik dalam membuat fasad, kanopi, dan teralis yang tipis, melengkung dan berlubang, dengan aspek permukaan yang estetis. Adanya penghapusan baja tulangan dengan teknologi bahan lain yang lebih kuat dan fleksibel, UHPC memberikan arsitek kebebasan baru dan variatif dalam mendesain arsitektur UHPC (Perry, 2023), diantaranya (TAKTL, 2016):

- Panel pelapis (pelapis penutup dan fasad berventilasi).
- Dinding tirai (terintegrasi dengan pasangan kaca).
- Penyelesaian sudut sesuai ketebalan panel.
- Peneduh atau reflektor cahaya.
- Layar dan kisi-kisi (digantung atau berdiri sendiri).
- Penghalang dan/atau difusi/pantulan.
- Sirip, penutup dinding, ornamen balok atas dan bawah jendela/pintu, muka air, dll. untuk fasad pasangan bata.

- Cetakan permanen untuk muka struktural berkualitas tinggi.
- Pot tanaman, bangku, penopang, dan elemen lanskap lainnya.

Sifat mekanis yang tinggi dari material UHPC dan didukung dengan teknologi elemen arsitektural yang menjadi lebih ringan, lantai bangunan gedung seperti perkantoran, kini dapat memiliki ruang bebas kolom berukuran 18,5 m x 18,5 m, sehingga memungkinkan tata letak dan desain interior yang lebih fleksibel (Amran, et.al., 2022). Hal tersebut juga berdampak pada ruang sistem mekanik, jaringan listrik, dan jaringan pipa dalam mengoptimalkan volume ruangan sekaligus menghemat biaya bangunan, dengan penampilan yang lebih estetis (Amran, et.al., 2022).



Gambar 4. Kombinasi Arsitektural dan Struktural UHPC: (a) *Shawnessy LRT station* di Kanada; (b). *Yayasan Louis Vuitton pour la Création*, Paris (Sumber: Tayeh, et.al., 2022); and (c) BDA'S Building Solutions Ltd., Bangladesh; (d) Rabat-salé Airport, Morocco (Sumber: Amran, et.al., 2022)

Aplikasi pada bangunan (**Gambar 4**) Yayasan *Louis Vuitton pour la Création* di Paris yang selesai dibangun pada 2014 menggunakan desain geometris yang rumit. Kemudian penggunaan atap dan kanopi bangunan *Shawnessy LRT station* di Kanada, yakni fasilitas pengolahan air limbah Prancis dengan model

cangkang lengkung tipis pracetak, Konstruksi atap *Jean Bouin Stadium* di Paris dan *Olympic Museum* di *Lausanne, Switzerland*, *Cladding* pada *Qatar National Museum*, termasuk fasad Terminal 1 *Rabat Airport* di Maroko (Tayeh, et.al., 2022; Amran, et.al., 2022).

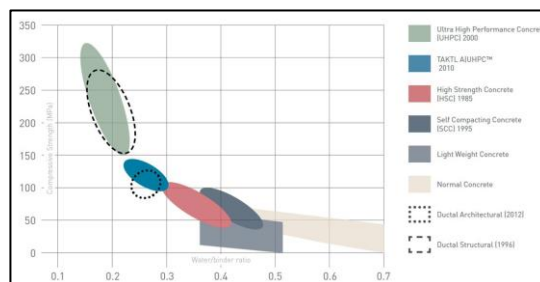
Performa dan Ketahanan

Struktur mikro padat UHPC juga dapat meningkatkan ketahanan terhadap dampak siklus beku-cair lingkungan dan agresinya berupa beban benturan dan angin, sehingga menghasilkan ketahanan elemen yang sangat lama, meskipun ketebalan beton berkurang hingga kurang dari 25,4 mm (1 inci) (Bianchi, 2018). Sementara komposisi UHPC arsitektural yang memiliki kekuatan tekan lebih rendah (<120 MPa) dan nilai laju alir sebaran tinggi (25 hingga 35 cm) yang memberikan kemampuan pemadatan sendiri yang diperlukan untuk menjamin pembuangan udara yang efisien dan kualitas permukaan yang tinggi untuk tekstur dan bentuk yang kompleks (permukaan dekoratif) (Bianchi, 2018).

Kekuatan tekan UHPC yang sangat tinggi disertai dengan mode kegagalan getas, maka mengharuskan penambahan tulangan untuk mencapai keuletan atau daktilitas yang diperlukan dalam kombinasi aplikasi struktural dan arsitektural. Aplikasi struktural dalam menahan beban digunakan tulangan serat baja karbon tinggi, dan dalam kasus aplikasi arsitektural, serat organik (polipropilena dan polivinil alkohol) dan anorganik (*ARglass*). Pada beton konvensional, meskipun tulangan baja turut menghasilkan kekuatan yang cukup tinggi, namun tulangan tersebut biasanya tidak digunakan dalam

aplikasi arsitektur karena alasan estetika (Bianchi, 2018), khususnya dari segi kemampuan dalam membentuk dimensi sesuai desain (Kodeboyina, 2023; Amran, et.al., 2022; Fang, 2021).

Kombinasi arsitektur dan struktural ditunjukkan *The Atrium*, di *Victoria, B.C.*, Kanada, dimana elemen fasad datar dan melengkung UHPC pada *Retaining Wall* terintegrasi yang diperkuat serat organik. Lalu, terdapat juga UHPC arsitektural AS dengan panel komposit arsitekturalnya yang terstandarisasi sebagai selubung bangunan yang memiliki kekuatan dan ketahanan, lebih sedikit material dengan keragaman tekstur, pola, warna, dan geometri (Bianchi, 2018).



Gambar 5. Klasifikasi Beton Berdasarkan Kuat Tekan dan Rasio Air (Sumber: Bianchi, 2018).

Gambar 5 memperlihatkan kuat tekan dan rasio air pada beton, dimana rentang kuat tekan UHPC arsitektural sebesar 90 MPa hingga 140 MPa. Masih menjadi kontroversial karena rentang tersebut berada di luar definisi formal UHPC struktural sebagai beton berkinerja paling tinggi, UHPC arsitektural dari perspektif kuat tekan, masuk dalam celah antara definisi UHPC dan HPC. Faktor yang mempengaruhi kuat tekan UHPC arsitektural yakni tipe semen (putih vs abu-abu) terhadap variasi warna, ukuran dan tipe fiber, dan lama pengeringan (Bianchi, 2018). Kuat tekan UHPC yang digunakan dalam

aplikasi arsitektur biasanya berkisar antara 17.000 psi (117 MPa) hingga 25.000 psi (172 MPa) (TAKTL, 2016).

Elemen UHPC pracetak arsitektur biasanya dikeluarkan dari cetakan setelah pengerasan akhir tercapai (11.000 psi atau 75 MPa). Jika elemen memiliki persyaratan struktural, elemen tersebut dapat diperlakukan secara termal setelah pengerasan dan pelepasan cetakan. Proses ini mengharuskan elemen pracetak UHPC terpapar pada suhu 60 C pada kelembaban relatif 95% selama 3 hari. Proses ini memungkinkan elemen UHPC arsitektur yang dikeraskan mencapai kekuatan dan karakteristik ketahanan tertingginya dengan menghidrasi semua air bebas (Garg, 2015).

Daya tahan yang cukup tinggi dari fasad eksterior UHPC (panel bertekstur) akan memberikan ketahanan yang unggul terhadap resiko benturan, serangan kimia, api, dan aktivitas seismik (Tayeh, et.al., 2022). Kombinasi UHPC arsitektural dan struktural, memungkinkan dalam menahan lingkungan laut yang keras akibat kadar garam, abrasi, porositas rendah dan pembekuan maupun pencairan (Iskandar, et.al., 2025; Perry, 2023; Tayeh, et.al., 2022). Meskipun UHPC memiliki banyak kelebihan untuk aplikasi arsitektur, pada proses untuk mencapai persyaratan kompleksitas dan hasil yang presisi, tetap dilakukan pemutakhiran evaluasi sifat mekanik dan analisis struktural fasad (Bianchi, 2018).

Oleh karena itu, kolaborasi lebih lanjut antara produsen dan ACI, PCI, ASTM, dan IBC masih diperlukan untuk mengembangkan evaluasi baru dan hukum konstitutif untuk analisis struktural dan desain elemen panel

fasad arsitektur yang diproduksi dengan UHPC dan kompositnya (Bianchi, 2018).

Massa dan Stabilitas

Di Indonesia, kerusakan berupa kegagalan fungsi bangunan dari ancaman gempa masih memiliki dampak tertinggi (Rachmawati, 2024). Perlunya peningkatan kemampuan fleksibilitas lateral struktur agar beban seismik yang diterima struktur berkurang dalam menerima gaya gempa (Chen, 2024). Gaya gempa yang bekerja sebanding dengan massa bangunan, sehingga apabila makin berat massa bangunannya, akan makin besar pula gaya gempa yang bekerja (Oktawati, 2024). Ataupun juga dapat dijelaskan bahwa makin berat massa struktur bangunan, maka efek momentum pendulumnya akan makin besar, dan resiko keruntuhan akan menjadi semakin besar (B-panel, 2012).

Kemampuan menciptakan kekuatan superior yang tipis dan ringan UHPC pada struktural dan arsitektural, maka sebanding dengan pengurangan volume dan bobot elemen (Kristanto, et.al., 2024). Hal ini akan memberikan jalan terhadap efektifitas berat keseluruhan komponen struktural dan arsitektural serta teknologi lain yang lebih tepat dalam mendukung fungsional dan estetik bangunan menjadi lebih stabil terhadap seismik. Pengurangan bobot fasad dapat mendorong pengurangan ukuran pondasi dan ukuran rangka struktural utama di sekeliling bangunan (TAKTL, 2016).

Kapasitas ketahanan terhadap seismik akan berdampak dalam kapasitas ketahanan jangka panjang bangunan, sehingga dapat menekan intensitas rehabilitasi pada struktur

beton selama masa umur pakai konstruksi (Amran, et.al., 2022).

Efisiensi dan Keberlanjutan

Masuknya banyak pemasok UHPC baru saat ini dengan rantai pasokan yang berbeda, menyebabkan harga satuan yang lebih rendah sehingga kian memfasilitasi penerimaan UHPC pada sektor yang lebih luas (Perry, 2023). Bila membandingkan biaya perakitan dan biaya pemasangan pada dinding penuh, UHPC Arsitektur berpotensi menghasilkan integrasi solusi kinerja lebih tinggi dan lebih murah dibandingkan GFRC pracetak maupun tradisional (TAKTL, 2016).

Arsitektur UHPC lebih mahal daripada beton pracetak konvensional atau bahkan beton berkinerja tinggi HPC, namun material yang digunakan jauh lebih sedikit untuk mencapai ukuran atau bentuk panel yang sama (TAKTL, 2016). Pada proyek tertentu dengan menggunakan lebih sedikit material, UHPC dapat membantu mengurangi dampak lingkungan secara keseluruhan dari konstruksi beton, karena lebih sedikit energi dan sumber daya yang dibutuhkan untuk produksi, transportasi, hingga pemasangan. Selain itu, peningkatan ketahanan UHPC dapat membantu memperpanjang masa pakai struktur beton, mengurangi kebutuhan untuk perawatan, perbaikan, dan penggantian (Zhou, et. al., 2018). Hal ini dapat berkontribusi pada penurunan konsumsi bahan baku, energi, dan emisi yang terkait dengan konstruksi beton dalam jangka panjang.

Pada gedung dengan konstruksi dinding bertingkat, UHPC Arsitektur merupakan material yang tidak mudah terbakar serta tidak memiliki

penyebaran api (TAKTL, 2016). Faktor ketebalan yang lebih tipis dengan didukung kekuatan yang lebih tinggi daripada kebanyakan panel komposit, khususnya ketahanan benturan dan kekuatan lentur, sangat dibutuhkan sebagai pelapis/selubung. Kemudian secara signifikan kebutuhan titik jangkar dan komponen sub-rangka dapat dikurangi, sehingga biaya material dan tenaga pemasangan dapat ditekan (TAKTL, 2016). Pada bangunan tempat tinggal, dapat diaplikasikan terhadap atap atau dinding yang ramah serta mendukung struktur dalam melayani fungsi tempat tinggal (Perry, 2023; Qaidi, 2022).

Potensi lain yakni meningkatkan efisiensi energi dan kinerja termal bangunan, termasuk keselamatan kebakaran (Xue, et. al., 2022). Karena kekuatannya yang tinggi dan permeabilitasnya yang rendah, UHPC dapat secara efektif mengisolasi bangunan dan meminimalkan perpindahan panas, sehingga mengurangi konsumsi energi untuk keperluan pemanasan dan pendinginan. Hal ini dapat berkontribusi pada penurunan emisi gas rumah kaca yang terkait dengan operasi bangunan dan membantu memerangi perubahan iklim. Permeabilitas UHPC yang rendah dapat meningkatkan ketahanan struktur beton terhadap degradasi lingkungan, seperti siklus beku-cair dan masuknya klorida (Li, et. al., 2020).

Hasil penelitian menunjukkan dimana balok UHPC menunjukkan emisi karbon yang serupa dan 48% siklus hidup emisi karbon lebih rendah dibandingkan balok beton konvensional (Fan, 2024). Upaya mengurangi jejak karbon UHPC memerlukan strategi inovatif, khususnya melalui penggantian

material konvensional dengan alternatif yang lebih berkelanjutan. Area fokus utama adalah penggantian semen atau agregat dengan produk sampingan industri, seperti terak baja, abu terbang, atau asap silika, yang sering tersedia sebagai material limbah. Material ini tidak hanya mengurangi beban lingkungan dengan mengalihkan limbah dari tempat pembuangan akhir, tetapi juga berkontribusi pada kinerja mekanis UHPC melalui reaksi pozzolan dan pemadatan struktur mikro. Penggabungan material limbah kedalam formulasi UHPC mengatasi tantangan ganda untuk meningkatkan kinerja sekaligus mengurangi jejak karbon material, yang sejalan dengan tujuan keberlanjutan global [10] (Bahmani, 2024; Wang, et.al., 2024).

Fleksibilitas dan kemampuan adaptasi UHPC juga berkontribusi pada potensinya sebagai material konstruksi berkelanjutan. Material tersebut dapat disesuaikan dengan aplikasi dan persyaratan kinerja tertentu (Jung et al., 2022), sehingga memungkinkan pengembangan solusi konstruksi yang inovatif dan berkelanjutan. UHPC dapat digunakan dalam kombinasi dengan material lain, seperti agregat daur ulang, material semen tambahan, dan serat alami, untuk menciptakan material *hybrid* dengan sifat yang ditingkatkan dan dampak lingkungan yang berkurang (Smarzewski dan Barnat-Hunek, 2018). Fleksibilitas ini memungkinkan pengembangan solusi beton baru dan berkelanjutan yang dapat memenuhi tuntutan industri konstruksi yang terus berkembang (Nilimaa, 2023).

KESIMPULAN

1. Rancangan eksterior pembentuk arsitektural dari UHPC Arsitektur

menjadi lebih inovatif dan kreatif khususnya dalam menghasilkan tekstur, bentuk dengan presisi tinggi serta memungkinkan tata letak dan desain interior yang lebih fleksibel dengan penampilan estetik.

2. Kuat tekan UHPC arsitektural, masuk dalam celah antara UHPC dan HPC, serta dapat memberikan kontribusi ketahanan yang unggul dalam rancangan struktural.

3. Diluar harga satuan yang mahal, UHPC Arsitektur berpotensi menghasilkan integrasi solusi kinerja lebih tinggi, material yang lebih sedikit dan mengurangi dampak lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada seluruh pihak atas dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini, khususnya kepada Akademi Militer selaku pemberi dana, sehingga dapat terselenggara tepat waktu dan tujuan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amran, M., Huang, S-S., Onaizi, A.M., Makul, N., Abdelgader, H.S., Ozbakkaloglu, T., 2022, Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects, *Construction and Building Materials*, 352. 352. 129029. ISSN 0950-0618, Pp: 1-79.
- B-panel, 2012, Penurunan Berat Bangunan dengan b-panel, Posted in News: Februari 2012.
- Bianchi, G.Q., Gannon, K., 2018, Classification + Reference Standards for UHPC in Architectural Applications, Conference: The Fifth BEST CONFERENCE Building Enclosure Science & Technology™ (BEST5™).

- Bahmani, H., Mostafaei, H., Santos, P., Chamasemani, N.F., 2024, Enhancing the Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) Through Silica Sand Replacement with Steel Slag, *Buildings* 2024. 14. 3520, Pp: 1-16.
- Chen, V., 2024, Perbandingan Respons Seismik Struktur Gedung Sistem Konvensional (Fixed Base) dengan Sistem Isolasi Dasar Double Friction Pendulum, Skripsi, Universitas Lampung.
- Fan, J., Shao, Y., Bandelt, M.J., Adams, M.P., Ostertag, C.P., 2024, Sustainable Reinforced Concrete Design: The Role of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) in Life-cycle Structural Performance and Environmental Impacts, *Engineering Structures* 316 (2024) 118585, Pp: 1-13.
- Fang, Y., 2021, Ultra High Performance Concrete Shear Walls, *EDP Sciences, E3S Web of Conferences* 294, 04004 (2021), Pp: 1-9.
- Filonchyk, M., Peterson, M.P., Yan, H., Gusev, A., Zhang, L., He, Y., Yang, S., 2024, Greenhouse Gas Emissions and Reduction Strategies for the World's Largest Greenhouse Gas Emitters, *Science of The Total Environment*, Volume 944 (20 September 2024) 173895.
- Garg, A., 2015, Architectural Use of Precast Ultra High Performance Concrete, *International journal of scientific research*, Vol. 4 No. 6 (June 2015), Pp: 1-7.
- Huda. M.K., Hapsari, O.E., Suriani, E., 2022, Perancangan *Mixed Use Building* dengan Pendekatan Arsitektur Tropis di Kota Surabaya, *MOZAIK-Buletin Perancangan Arsitektur*, Vol. 1, No. 1 (Maret 2022), Pp: 1-8.
- Iskandar, S.N., Oesman, M., 2025, Ultra High Performance Concrete (UHPC) with Coarse Aggregate, *International Journal of Research Publication and Reviews*, Vol. 6, No. 4 (April 2025), Pp: 8205-8213.
- Jung, M., Park, J., Hong, S.G., Moon, J., 2022, The Critical Incorporation Concentration (CIC) of Dispersed Carbon Nanotubes for Tailoring Multifunctional Properties of Ultra-High Performance Concrete (UHPC), *J. Mater. Res. Technol.* 17, 3361–3370.
- Kodeboyina, G.B., Thotakura, L., Virneni, D., Bhojaraju, C., 2023, Ultra-high Performance Concrete as a Sustainable Structural Composite, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1149 (2023) 012002, Pp: 1-9.
- Kristanto, L., Prapsetyo, A., 2024, *Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): Material Behavior Review for Military Field Prospects*, *Jurnal Teknik Sipil Pertahanan*, Vol. 12 No.1 (Juli 2024), Pp: 1-11.
- Li, J., Wu, Z., Shi, C., Yuan, Q., Zhang, Z., 2020, Durability of Ultra-High Performance Concrete—A Review, *Construct. Build. Mater.* 255, 119296.
- Morcous, G., Kodsý, A., El-Khier, M.A., 2024, Flexural Behavior of Composite Ultrahigh-Performance Concrete Sandwich Wall Panels, *Journal of Architectural Engineering*, Vol. 30 No. 2 (February 23, 2024).
- Naseer, A.N., Al-Gahtani, K.S., Altuwaim, A.A., Alsanabani, N.M., Almohsen, A.S., 2024, Selecting Building Façade Materials by Integrating Stepwise Weight

- Assessment Ratio Analysis and Weighted Aggregated Sum Product Assessment into Value Engineering, Sustainability 2024, 16, 4611 (29 May 2024), Pp: 1-32.
- Nilimaa, J., 2023, Smart materials and technologies for sustainable concrete construction, Developments in the Built Environment 15 (2023), Pp: 1-9.
- Oktawati, A.E., 2024, Sambungan Konstruksi Bola Tungke' terhadap Mitigasi Bencana Gempa Bumi di Soppeng, JAMBURA Journal of Architecture, Vol. VI No. 2 (2024), Pp: 57-66.
- Perry, V.H.(Vic), 2023, The Future of Ultra-High Performance Concrete, Third International Interactive Symposium on Ultra High Performance Concrete, Primary Topic Area: Sustainable World, Secondary Topic Area: UHPC Infrastructure solutions, Pp: 1-8.
- Qaidi, S.M., Dinkha, Y.Z., Arbili, M.M., Haido, J.H., Tayeh, B.A., 2022, Properties of Sustainable Green Concrete Containing Waste Glass as Eco-friendly Aggregate: A Review. AIP Conf. Proc. 50 (1), 020121
- Rachmawati, M., 2024, Mewujudkan Bangunan yang Lebih Tahan Gempa dengan Konsep Confined Masonry, [https://www.usace.army.mil/Media/News/NewsSearch/Article/3373781/stronger-lighter-more-durable-ultra-high-performance-concrete-is-key-to-a-more/](https://greennetwork.id/kabar/mewujudkan-bangunan-yang-lebih-tahan-gempa-dengan-konsep-confined-masonry/#:~:text=Dua%20komponen%20struktural%2C%20yaitu%20dinding,menahan%20gaya%20gravitasi%20dan%20gempa.&text=Di%20Indonesia%2C%20konsep%20ini%20juga,menentukan%20jenis%20fondasi%20yang%20tepat., Green Network: Kabar Unggulan (4 Desember 2024), diakses pada 21 Mei 2025.</p><p>Reeves, T., 2023, Stronger, Lighter, More Durable: Ultra-High Performance Concrete is Key to a More Sustainable and Modern Infrastructure Network, <a href=), U.S. Army Engineer Research and Development Center (April 2023), diakses pada 18 Mei 2025.
- Shotwell, B., 2024, Building Resilient Smart Cities: Leveraging Technology for Disaster Preparedness, <https://microspace.com/building-resilient-smart-cities-leveraging-technology-for-disaster-preparedness/>, Microspace.com (25 September 2024), diakses pada 16 Mei 2025.
- Smarzewski, P., Barnat-Hunek, D., 2018, Property Assessment of Hybrid Fiber-reinforced Ultra-High-Performance Concrete, Int. J. Civ. Eng. 16, 593-606.
- Sun, C., Wang, K., Liu, Q., Wang, P.J., Pan, F, 2023, Machine-Learning-Based Comprehensive Properties Prediction and Mixture Design Optimization of Ultra-High-Performance Concrete. Sustainability 2023, 15, 15338.
- Tabibi, A., 2024, Smart Buildings and Disaster Resilience: Lessons from Natural Disasters, <https://green.org/2024/01/30/smart-buildings-and-disaster-resilience-lessons-from-natural-disasters/>, Green.org (30 Januari 2024), diakses pada 16 Mei 2025.

- TAKTL, 2016, Architectural Ultra High Performance Concrete, Continuing Education,
- Tayeh, B.A., Askar, L.K., Askar, M.K., Abu Bakar, B.H., 2022, Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) – Applications Worldwide: A State-of-the-Art Review, Journal of Engineering Research and Technology, Vol. 10, No. 1 (March 2023), Pp: 12-27.
- Wang, M., Du, M., Jia, Y., Chang, C., Zhou, S, 2024, Carbon Emission Optimization of Ultra-HighPerformance Concrete Using Machine Learning Methods, Materials 2024, 17, 1670.
- Xue, C., Yu, M., Xu, H., Xu, L., Saafi, M., Ye, J., 2022, Experimental Study on Thermal Performance of Ultra-High Performance Concrete with Coarse Aggregates at High Temperature, Construct. Build. Mater. 314, 125585.
- Zhou, M., Lu, W., Song, J., Lee, G.C., 2018, Application of Ultra-High Performance Concrete in Bridge Engineering, Construct. Build. Mater. 186, 1256–1267.
- Zhang, X.Y., Yu, R., Zhang, J.J., Shui, Z.H., 2022, A Low-carbon Alkali Activated Slag Based Ultra-High Performance Concrete (UHPC): Reaction Kinetics and Microstructure Development, J. Clean. Prod. 2022, 363, 132416.