

Evolusi Fasade Adaptif Rumah Modular

Basuki, Ary Sismiani, Johannes Bonivasius Muda

Prodi Arsitektur, Universitas Wijayakusuma Purwokerto

Email : basuki@unwiku.ac.id

ABSTRAK

Perkembangan teknologi sering mempengaruhi cara-cara bangunan rumah tinggal beradaptasi dengan lingkungan. Hal tersebut tercermin dalam tampilan fasade bangunan. Artikel ini mengemukakan perbandingan perkembangan rumah modular dalam beradaptasi dengan lingkungan seiring dengan perkembangan teknologi. Fokus studi lebih pada tampilan fasade bangunan. Analisis dilakukan pendekatan deskriptif kualitatif. Fokus studi adalah: (1) perkembangan rumah modular sebelum era industrialisasi, (2) perkembangan rumah modular sebelum era industri massal, (3) perkembangan rumah modular era teknologi digital. Pengumpulan data diperoleh dari data sekunder dalam bentuk artikel, buku, makalah hasil seminar. Studi kasus melalui beberapa sampel kasus (case multiple) untuk memberikan contoh praktik. Hasil studi menemukan bahwa rumah modular adaptif sudah dikembangkan baik dalam arsitektur tradisional, arsitektur era industri massal, maupun era teknologi digital. Rumah modular arsitektur tradisional dalam beradaptasi dengan lingkungan lebih bersifat statis. Teknologi digital memberikan peluang pengembangan rumah modular dan elemennya yang lebih dinamis (fleksibel), kompleks dan terintegrasi.

Kata kunci: Rumah Modular, Adaptasi Bangunan, Fasade Bangunan, Perkembangan Teknologi

ABSTRACT

Technological developments often affect the way residential buildings adapt to the environment. This is reflected in the appearance of building facades. This article presents a comparison of the development of modular houses in adapting to the environment along with technological developments. The focus of the study is more on the appearance of building facades. The analysis was carried out using a qualitative descriptive approach. The focus of the study is: (1) the development of modular houses before the industrialization era, (2) the development of modular houses before the mass industry era, (3) the development of modular houses in the digital technology era. Data collection was obtained from secondary data in the form of articles, books, seminar papers. Case studies through several case samples (case multiple) to provide examples of practice. The results of the study found that adaptive modular houses have been developed both in traditional architecture, mass industry era architecture, and the digital technology era. Traditional architectural modular houses in adapting to the environment are more static. Digital technology provides opportunities for the development of modular houses and their elements that are more dynamic (flexible), complex and integrated.

Keyword : *Modular House, Building Adaptation, Building Facade, Technology Development.*

1. PENDAHULUAN

Pembangunan rumah yang adaptif terhadap lingkungan sebenarnya bukan merupakan hal baru di Indonesia. Secara historis, masyarakat Indonesia sudah lama membangun rumah yang adaptif terhadap lingkungan, seperti: rumah panggung, bentuk bangunan simetris, dinding berpori, material alami, lokal dan ramah lingkungan [3] [17]. Masyarakat tradisional nusantara telah lama membangun rumah untuk hidup selaras dengan alam. Hal tersebut membuktikan bahwa masyarakat zaman dulu memang sudah beradaptasi pada lingkungan alam dan bencana.

Demikian juga, konsep modular dalam pembangunan rumah tinggal sebenarnya bukan merupakan konsep yang baru di Indonesia. Sistem modular sudah dikenal pada arsitektur tradisional Nusantara [3]. Masyarakat tradisional di Indonesia telah lama mengenal dengan sistem modular bongkar pasang yang elemennya di produksi terlebih dahulu baik di lokasi maupun terpisah dari lokasi sebelum dirakit di lokasi. Masyarakat tradisional Indonesia menggunakan sistem modular pada struktur bangunan simetri dan material alami selain untuk estetika juga tahan gempa. Masyarakat tradisional telah lama menggunakan tukang kayu untuk menyiapkan struktur dan ornamen yang indah dan kokoh sebelum diterapkan di lokasi. Keindahan elemen struktur dan ornamen bangunan rumah tradisional juga terdapat dalam sistem bongkar pasang. Ruang-ruang dalam rumah tinggal dapat mudah dirubah menjadi lumbung padi pada saat panen, atau aula pada kondisi hajatan. Hal ini tidak hanya berkontribusi pada sejarah konstruksi modular di Indonesia, tetapi juga juga

memberikan wawasan yang berguna untuk arsitek modern dengan teknologi dan skala yang berbeda untuk pembangunan rumah pasca bencana.

Perkembangan teknologi merubah cara-cara rumah atau bangunan beradaptasi dengan lingkungan. Perkembangan teknologi mempengaruhi evolusi mode adaptif dalam fasade bangunan [8], seperti dalam konsep: *smart wall*, *kinetic wall*, *green wall*, *bio-robotic wall*, *parametric wall* [2] [8] [11] [16] [24]. Teknologi digital memberikan peluang perancangan bangunan, kontrol bangunan berbasis data dan informasi. Teknologi digital memberikan menghasilkan bentuk geometris yang kompleks dengan memanfaatkan sejumlah besar data dan informasi, teknik pemrograman dengan bantuan algoritma. Data dan informasi tidak hanya ternegrasi dalam proses perancangan, namun kontrol lingkungan eksternal seperti: cuaca, suhu, kelembaban, suara, bahkan sosial, dan tata kota.

Perkembangan teknologi merubah cara-cara produk rumah dirancang, diproduksi, dikontrol dan di evaluasi. Teknologi digital banyak digunakan dalam pengembangan rumah modular prefabrikasi baik proses perancangan, kontrol kualitas produksi dan operasional [9-10] [15] [20] [26]. Teknologi digital melalui metode numerik dapat digunakan untuk menghasilkan model *prototipe* atau simulasi proses, Perkembangan *computer-aided design* (CAD) dan *computer-aided manufacturing* (CAM) memberikan kemudahan alternatif metode dalam pengembangan rumah modular (Deng, 2020; Doe, 2020; Jutraž & Moine, 2016; Ostrowska-wawryniuk, 2020; Smith, 2011). Perangkat lunak berbasis *computer-aided design* (CAD) membantu membuat model model prototipe 3D, Perangkat lunak berbasis *computer-aided design* (CAD) membantu membuat model *prototipe* 3D untuk dievaluasi sebelum membuat model prototipe fisik yang mahal dan memerlukan waktu. *Software* CAM memberikan data instruksi untuk mesin, manajemen proses manufaktur untuk rekayasa produksi. Perkembangan teknologi digital yang cepat mempermudah data dan informasi dari CAD dapat ditransfer ke CAM untuk menghasilkan proses produksi, output elemen dan kombinasi material yang bervariasi. Perangkat lunak CAD dan CAM juga terintegrasi dengan *Building Information Modelling* (BIM) yang dapat membuat model parametrik tiga dimensi yang mencakup informasi desain dan konstruksi geometri dan non-geometris. Perkembangan teknologi digital alternatif cara (dicetak, diprint, dipotong, dikombinasikan), alternatif material (beton, metal, kayu, komposit) dan proses (perencanaan, kontrol, evaluasi) dengan menerapkan prinsip-prinsip estetika desain (kesatuan, irama, keseimbangan, proporsi, keselarasan) [7].

Kemampuan beradaptasi [2] [12] dan kemampuan fleksibilitas [30] sering digunakan secara bergantian dalam literature [24]. Kedua istilah tersebut didefinisikan berbeda dalam beberapa literatur. tetapi perbedaan sering tidak konsisten di seluruh sumber. Misalnya, beberapa orang memandang fleksibilitas sebagai perubahan jangka pendek pada bangunan, misal: tata letak interior bangunan, sedangkan kemampuan beradaptasi tentang perubahan jangka panjang. Adaptasi bangunan dalam pendekatan statis jangka panjang dilakukan melalui strategi: mengurangi jumlah konstruksi baru (*reduce*), mengaktifkan stok bangunan yang kurang dimanfaatkan atau kosong (*re-activate*) dan meningkatkan pembongkaran/dekonstruksi komponen (*re-use, recycle*)), memperpanjang masa pakai umur manfaat bangunan (keberlanjutan) [24]. Beberapa kegiatan seperti renovasi, penggunaan kembali (*adaptive reuse*), perbaikan, renovasi, pemulihan, konversi, transformasi, rehabilitasi, modernisasi, *refurbishment*, restorasi dan daur ulang bangunan yang digunakan untuk mendefinisikan kegiatan adaptasi. Literatur terbaru mengemukakan kemampuan adaptasi bangunan lingkungan yang lebih dinamis, seperti: dinding dinamis fasade bangunan, material atau tampilan texture yang mudah dirubah, *di-upgrade*, *di-install* [11] [16] [23] [24] [29]. Hal ini mengaburkan konsep adaptif jangka panjang dan adaptif dinamis (fleksibel jangka pendek).

Artikel ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perkembangan teknologi terhadap cara-cara rumah modular beradaptasi dengan lingkungan yang diantaranya tercermin dalam tampilan fasade bangunan. Artikel ini terdiri dari lima sub pokok bahasan. Pokok bahasan pertama merupakan pendahuluan terkait motivasi studi. Pokok bahasan kedua membahas konsep adaptasi bangunan dan rumah modular. Pokok bahasan ketiga membahas metode kajian dilakukan, terkait pendekatan, sumber data, analisis. Pokok bahasan keempat membahas temuan studi. Terakhir merupakan bagian kesimpulan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan pendekatan kualitatif. Penelitian dilakukan melalui eksplorasi secara deskriptif perkembangan rumah modular dalam beradaptasi dengan lingkungan sebelum era industrialisasi, era industri

massal, dan era teknologi digital. Analisis dilakukan dengan studi kasus. Sampel kasus diambil bukan untuk mewakili populasi, tetapi lebih bersifat untuk mengeksplorasi adanya fenomena relevansi dan praktek yang potensial. Pengumpulan data dilakukan dengan menggunakan data sekunder yang terpublikasi secara offline maupun online di media internet. Dokumen-dokumen terkait yang tertuang dalam jurnal akan dianalisa berdasarkan beberapa teori dan literatur yang relevan.

Analisis data terutama mengikuti penalaran induktif [6]. Ini juga mengambil keuntungan dari ide-ide yang mendasari analisis tematik. Pendekatan analisis data ini mencari topik yang tampak penting untuk memahami fenomena yang menjadi fokus. Reduksi data di sini didukung melalui segmentasi, kategorisasi, dan meringkas konsep yang relevan dalam kumpulan data yang diperiksa. Analisis lintas kasus bertujuan untuk menyoroti perbedaan dan persamaan antara kasus yang terlibat, yang didukung oleh topik yang diidentifikasi pada langkah sebelumnya. Selain itu, tabel perbandingan diproduksi untuk memungkinkan analisis lintas kasus. Ini juga membantu para peneliti mendiskusikan temuan dan menyepakati topik yang relevan yang diperlukan untuk mencapai tujuan penelitian.

3. HASIL DAN ANALISIS

1. Perkembangan Rumah modular sebelum Revolusi Industri

Konsep modular dalam arsitektur sebenarnya bukan merupakan hal yang baru [1]. Sistem modular sudah dikenal pada arsitektur klasik Yunani Kuno dan Romawi Kuno [22]. Elemen arsitektur klasik seperti: kolom, balok, dinding, cahaya, udara disusun dalam sistem modular. Arsitektur pada masa Dinasti Ming (1368-1644) dan Qing (1644-1912) di China telah lama menggunakan bengkel tukang kayu yang indah dan kokoh sebelum diterapkan di lokasi. Hal ini tidak hanya berkontribusi pada akar kuno konstruksi modular di Tiongkok, tetapi juga memberikan wawasan yang berguna untuk arsitek modern dengan teknologi dan skala yang berbeda. Masyarakat tradisional Jepang menggunakan sistem modular pada struktur bangunan, dinding geser selain untuk estetika juga tahan gempa [19]

Masyarakat tradisional di Indonesia sistem modular bongkar pasang yang elemennya di produksi terlebih dahulu baik di lokasi maupun terpisah dari lokasi sebelum dirakit di lokasi [3][17]. Konsep modular dalam pembangunan rumah tinggal juga bukan merupakan konsep yang baru di Indonesia. Keindahan elemen struktur dan ornamen bangunan melalui sistem modular sudah dikenal pada arsitektur tradisional Nusantara. Masyarakat tradisional di Indonesia seperti: Jawa, Nias, Lombok, Bali, mengenal rumah modular yang dibangun dengan sistem modular bongkar pasang yang elemennya di produksi terlebih dahulu baik di lokasi maupun terpisah dari lokasi sebelum dirakit di lokasi.

Masyarakat tradisional Nusantara merespon lingkungan alam, sistem sosial-budaya dalam kualitas estetik konstruksi (the art of construction) dalam modul struktur, material dan detail ornamen bangunan [3][17]. Struktur simetris, joint sambungan yang kuat dan fleksibel, material alami menjadi kualitas estetik konstruksi rumah tinggal sekaligus respon terhadap alam. Masyarakat tradisional nusantara sudah lama mengajarkan tentang bagaimana memahami alam dan pergerakannya. Pengetahuan tersebut digunakan dalam membangun dalam tradisi sistem konstruksi rumah secara berkelanjutan. Struktur elemen dan konstruksi bangunan tidak hanya untuk membangun bangunan yang kokoh, kuat dan awet tetapi menjadi perwujudan ekspresi tektonik seperti dalam kejujuran penggunaan dan perlakuan material dan artikulasi sistem sambungan (joint system). Aspek teknis seperti gaya, penyaluran beban struktur dan mekanika bangunan ditransformasikan ke dalam beragam ekspresi bentuk sambungan dan detail konstruksi melalui sebuah proses yang jernih dan logis. Tradisi arsitektur rumah tradisional nusantara memberikan narasi pengalaman tentang bagaimana cara-cara hidup yang berdamai dan selaras dengan gerak alam yang tidak pasti. Keindahan elemen struktur dan ornamen bangunan rumah tradisional juga terdapat dalam sistem bongkar pasang. Ruang-ruang dalam rumah tinggal dapat mudah dirubah menjadi lumbung padi pada saat panen, atau aula pada kondisi hajatan.





Gambar 1. Fasade Rumah Modular Adaptif Tradisional Nusantara

Material rumah-rumah tradisional nusantara diambil dari material lokal sebagai anugerah alam dan diproses secara sederhana. Material alam seperti tanah, batu, kayu, bambu, alang-alang, ranting-ranting, daun-daun kering, serta bagian-bagian tubuh hewan ternak menjadi elemen sistem konstruksi rumah. Masyarakat tradisional nusantara telah memiliki local genius dan kesadaran penuh terhadap keterbatasan dan kekayaan alam untuk membangun arsitektur yang tidak sekali pakai tetapi secara berkelanjutan. Kualitas material diantaranya dicapai melalui perlakuan material secara tepat.

2. Perkembangan Rumah modular Era Industri Massal

Penggunaan sistem modular dalam produksi massal rumah sebagai bagian dari industri telah muncul sejak awal revolusi industri pada abad kesembilan belas [22]. Teknologi pabrikasi memproduksi komponen bangunan ke dalam unit modular, seperti: panel dinding dan elemen bangunan lainnya dibuat di pabrik, kemudian diangkut ke lokasi pembangunan untuk dipasang di atas pondasi permanen. Konsep modular pada bangunan dengan melibatkan industri (off site) dengan mesin-mesin otomatisasi sebelum dirakit ke lokasi (on site). Periode modern yang berkembang seiring dengan era industrialisasi massal yang menekankan nilai-nilai efisiensi ekonomi meninggalkan beberapa permasalahan, seperti isu sosiologis (inklusivitas/rumah untuk semua, rumah seragam-heterogenitas), ekologi (degradasi sumberdaya, polusi).

Perancangan sistem modular pada rumah tinggal seperti halnya pada elemen mobil, pesawat terbang, dan kapal [13]. Le Corbusier melihat arsitektur yang diproduksi secara massal sebagai bagian dari upaya menciptakan mesin untuk hidup, Le Corbusier merancang dan membangun prototipe yang disebut Rumah Citroën. istilah " Citroën " digunakan mengacu pada mobil Prancis pada waktu tersebut [5]. Citroën bermaksud agar rumahnya dibangun di pabrik atau prefabrikasi, melalui metode produksi massal. Arsitek melalui prefabrikasi dapat membuat sistem konstruksi yang didasarkan pada rasionalisasi melalui standarisasi [26].

Frank Lloyd Wright pada tahun 1932 mengembangkan konsep "rumah rakitan." Rumah-rumah ini harus terdiri dari unit-unit standar yang menjadi blok bangunan spasial yang akan mendefinisikan berbagai ruangan. Modul secara konseptual adalah kit-of-parts dan dapat ditambahkan dan disusun. Wright dalam pemikirannya tentang bagaimana bangunan prefabrikasi dapat berkembang menjadi organisme hidup. Saat ini, konstruksi modular untuk konstruksi standar, untuk mengurangi durasi proyek dan meningkatkan kualitas. Dari tempat tinggal kelas atas oleh Marmol Radziner Prefab, hingga trailer konstruksi sementara, dari rumah prefabrikasi hijau oleh Michelle Kaufmann, hingga rumah produksi berbingkai kayu, modular telah menjadi metode standar [26].

Pada tahun 1932, Howard T. Fisher mengembangkan General Houses Corporation untuk memproduksi perumahan pascaperang. Rumah Fisher dipusatkan untuk mengambil keuntungan dari produksi massal Fordist; rumahnya harus dirakit secara harfiah sebagai mobil. General Houses menerapkan komponen bangunan dari perusahaan pemasok (industri) yang ada di pasar. Pencapaian teknologi terbesar Fisher adalah dalam pengembangan sistem dinding panel sandwich logam yang menggunakan teknologi serupa dari industri pesawat terbang yang dikembangkan selama perang. Fisher juga mendapat dukungan dari para industrialis General Electric, Pittsburgh Glass, dan Pullman Car Co. Usahanya, mirip dengan para arsitek pada waktu tersebut untuk menghasilkan bangunan modern, lantai, atap, dan melakukannya dalam estetika di industri. Fisher sangat optimis dengan selera publik, dan strategi pemasarannya untuk menjual perumahan yang paling inovatif dan kontemporer dalam kenyamanan dan estetika dikaitkan dengan perusahaannya yang hampir mati. Ironisnya, bertahun-tahun kemudian perusahaan tersebut berhasil memproduksi rumah bergaya tradisional di sembilan negara bagian. Inovasi Fisher memberikan babak baru dalam pemikiran pabrikasi— bahwa sebuah rumah dapat dikembangkan ke pabrik dan dirakit di luar lokasi dari komponen yang disediakan oleh perusahaan yang berbeda, sama seperti mobil yang diproduksi saat ini [26].

Elemen prefabrikasi mengacu pada bentuk atau konfigurasi output. Komponen, panel, dan modul adalah kategori umum di mana bangunan dibuat atau diproduksi di luar lokasi dan dirakit di lokasi. Definisi komponen, panel, dan modul belum konsisten baik dalam teori dan praktik. Kategorisasi komponen, panel, dan modul hanyalah sebuah metode organisasi untuk menggambarkan elemen prefabrikasi yang dibuat di industri dan diaplikasikan di lokasi. Kombinasi elemen yang dapat digunakan untuk mencapai fungsi dan tujuan estetika proyek.

Arsitektur adaptif dan fleksibel pada awalnya dibayangkan dalam fiksi ilmiah. James Graham Ballard, seorang novelis Inggris, pada tahun 1962 menggambarkan sebuah "psychotropic house" yaitu rumah seperti mesin yang peka, merespons dan belajar dari suasana hati penghuninya. Material rumah dibuat dari "plastex," kombinasi plester dan lateks yang memungkinkan rumah berubah bentuk sesuai kebutuhan. Proyek hipotetis Walking City Ron Herron pada tahun 1964 membayangkan kota sebagai struktur robot raksasa yang dapat dipindahkan dan dapat dipindahkan. Pada tahun 1970-an, Isaacs [28] mengembangkan ruang hidup modular, fleksibel, dan multi guna untuk digunakan dalam konteks pedesaan atau perkotaan. Arsitektur modular telah memberikan kesadaran publik terhadap pentingnya merancang bangunan dengan tujuan memecahkan masalah lingkungan. Ide utama sistem modular adalah untuk mempermudah sistem bangunan dengan cepat mengkonfigurasi model dalam pengambilan keputusan dan pencapaian tujuan [28]. Sistem modular terdiri dari beberapa komponen bangunan, peralatan dan furnitur yang dikodifikasi, diklasifikasikan dan dikonfigurasi secara modular [10][21][25].

Konsep pertama arsitektur adaptif dan responsif seperti yang dipahami saat ini lahir pada akhir 1960-an dan awal 1970-an, terutama sebagai hasil dari perkembangan sibernetika, kecerdasan buatan, dan teknologi informasi. James Graham Ballard pada tahun 1962 menulis sebuah "psychotropic house", sebuah rumah seperti mesin berbahan kombinasi plester dan lateks yang memungkinkan rumah berubah bentuk sesuai kebutuhan. Pada tahun 1970-an, Isaacs [8] mengembangkan ruang hidup modular, fleksibel, dan multi guna untuk digunakan dalam konteks pedesaan atau perkotaan. Arsitektur modular telah memberikan kesadaran publik terhadap pentingnya merancang bangunan untuk adaptif terhadap masalah lingkungan dengan tujuan memecahkan masalah lingkungan. Ide utama sistem modular adalah untuk mempermudah sistem bangunan dengan cepat mengkonfigurasi model dalam pengambilan keputusan dan pencapaian tujuan.

Nicholas Negroponte pada tahun 1975 mengembangkan sistem komputasi yang diintegrasikan ke dalam bangunan sehingga "mesin arsitektur" dapat "dibantu," "ditambah," dan akhirnya "direplikasi" oleh komputer." Tujuannya adalah untuk "mempertimbangkan lingkungan fisik sebagai mekanisme yang berkembang." Charles Eastman pada tahun 1972 menggunakan analogi termostat untuk menggambarkan komponen penting: sensor yang akan mencatat perubahan di lingkungan, mekanisme kontrol (atau algoritme) yang akan menafsirkan pembacaan sensor, aktuator sebagai perangkat yang akan menghasilkan perubahan di lingkungan, dan perangkat (antarmuka) yang memungkinkan pengguna. Beberapa gagasan tersebut menjadi gagasan awal komponen sistem bangunan adaptabel yang dikembangkan hingga saat ini.

3. Perkembangan Rumah Modular Era Digital

Konsep bangunan adaptif dan fleksibel semakin banyak muncul seiring dengan kemajuan teknologi digital, bangunan cerdas, bangunan kinetik dan konsep adaptive reuse. Perencanaan bangunan adaptif-fleksibel ini bertujuan untuk menghasilkan hasil dari desain yang diinginkan, mengatasi situasi yang tidak pasti, memberikan banyak pengalaman, mudah digunakan. Perkembangan teknologi digital memungkinkan elemen bangunan dibentuk sesuai dengan proses algoritmik. Metode ini berbeda dengan dengan metode perancangan secara langsung. Dalam metode ini, parameter dan aturan menentukan hubungan antara desain dan respons desain. Istilah parametrik mengacu pada parameter input yang dimasukkan ke dalam algoritma [27]. Parameter yang berbeda-beda digunakan untuk "mengoptimalkan" bentuk arsitektur [1]. Parameter struktur bangunan, efisiensi energi, paparan sinar matahari, lokasi, akustik, atau aerodinamika digunakan untuk parameter untuk membentuk bangunan.

Konsep rumah modular adaptif-fleksibel melahirkan beberapa konsep penting, seperti arsitektur dinamis, organis, dan bio-robotik. Selama dekade terakhir, perkembangan teknologi komputasi telah secara dramatis mengubah desain dengan memperkenalkan kemampuan untuk iterasi besar-besaran, kompleksitas geometris, pemecah evolusi, optimasi multi-variabel, dan berbagai alat lainnya. Banyak solusi dapat ditarik keluar untuk simulasi dan dianalisis secara struktural, lingkungan atau terhadap berbagai metrik lainnya. Komputasi secara mendasar telah mengubah apa yang dapat kita desain dan bagaimana mendesain. Alat dan metode komputasi memungkinkan desainer untuk melampaui apa yang dapat mereka bayangkan secara mandiri. Alat CAM dan fabrikasi digital juga telah secara radikal mengubah proses pembuatan elemen atau produk. Kode kini telah menjadi bahasa desain, bahasa analisis serta bahasa untuk berkomunikasi dengan mesin untuk fabrikasi dan

manufaktur. Alat digital memungkinkan proses yang disederhanakan dari ide hingga desain komputasi hingga kode mesin.

Program CAD sebagai aplikasi gambar telah mengalami pergeseran dari alat untuk menggambar secara tradisional, menjadi Computer Aided Design dan Computer Aided Manufacturing (CAD/CAM), BIM (Building Information Modelling) dan terakhir Generative Design. CAD digunakan tidak hanya sebagai alat representasi dua dimensi dan simulasi tiga dimensi, namun juga alat fabrikasi untuk mewujudkan ide bentuk arsitektur dalam proses konstruksi. Fabrikasi Digital adalah jawaban atas perubahan zaman itu terjadi di dunia Arsitektur dan desain. Fabrikasi digital diyakini sebagai pemicu revolusi desain. Bahan Teknik dan pengetahuan digital menjembatani model simulasi yang hanya dapat dilihat di komputer menjadi artefak fisik.

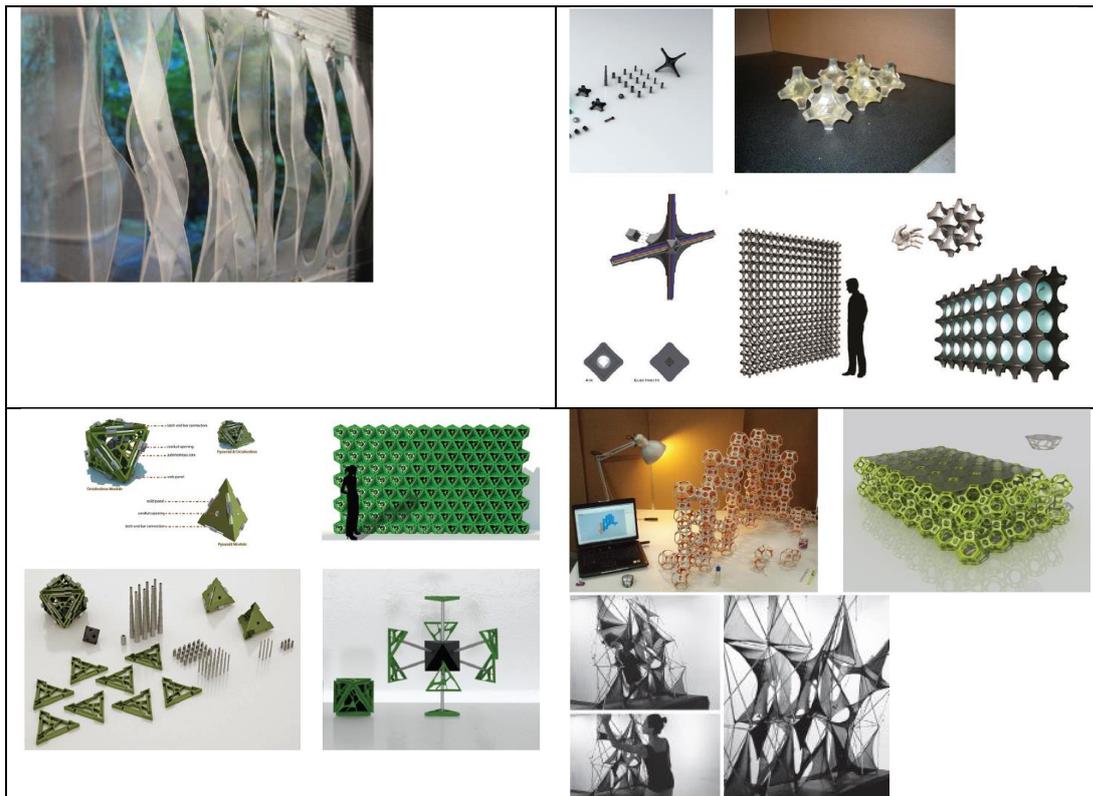
Prafabrikasi, proses pembangunan di pabrik, menyiratkan model produksi massal Fordist Namun, metode produksi saat ini dalam pembuatan mobil telah bergerak secara dramatis melampaui pengertian standarisasi, skala ekonomi, dan teknologi. Proses produksi saat ini, melalui penggunaan teknologi digital baik untuk desain maupun fabrikasi melalui sistem Computer Aided Design dan Computer Aided Manufacturing (CAD/CAM), terbukti menjadi pergeseran paradigma dalam ideologi produksi. Pencerahan ini tidak hanya memengaruhi pengembangan teknologi pabrikan, tetapi juga konstruksi sosial yang digunakan untuk memproduksi bangunan, struktur hubungan, dan desain antarmuka. Fabrikasi digital berpotensi menjadi metode di mana prefabrikasi—peningkatan pelengkap dalam desain dan kualitas produksi—dapat direalisasikan.

Dua kekuatan memunculkan teknologi CAD/CAM. Pertama adalah kaitan dengan Revolusi Industri dan produksi massal serta otomatisasi digital. Otomasi lebih merupakan teknologi komputer daripada manufaktur. Ini adalah proses menciptakan produk melalui mesin otomatisasi, atau sengaja dibuat untuk meniru proses kerja manusia yang terampil, dikendalikan oleh instruksi yang diberikan melalui perintah numerik atau Computer numerical control (CNC). Meskipun saat ini dua prinsip CAD/CAM termasuk komputer dan produksi hampir tidak dapat dibedakan sebagai entitas terpisah di banyak industri, termasuk mobil dan pesawat terbang, pemisahan ini secara teoritis diperlukan untuk lebih efektif menggunakan metode baru ini untuk memajukan arsitektur cetakan.

Iwamoto menjelaskan bahwa teknologi digital memberikan dukungan proses fabrikasi terkait kemudahan dalam mengembangkan tampilan bentuk elemen bangunan [14]. Teknologi digital memberikan kemudahan elemen bangunan seperti: dipotong, dicetak, digabungkan, dibuat tekstur. Teknologi bangunan memberikan kemudahan elemen bangunan untuk digabungkan dan dimanipulasi. Iwamoto mengklasifikasikan fabrikasi dalam Arsitektur digital, meliputi Sectioning, Tessellating, Folding, Contouring, forming.

Dunia konstruksi dan manufaktur era ini terdiri dari produk yang sangat kompleks, dibangun dengan bagian-bagian yang kompleks, disatukan dengan cara yang kompleks, dan dioperasikan di lingkungan yang kompleks. Pada akhirnya, bertujuan untuk mengubah mentalitas dan menemukan aplikasi yang memanfaatkan material cerdas, produk, dan proses perakitan untuk lingkungan binaan yang lebih elegan, skalabel, dan adaptif. Arsitektur bio-robotik diantaranya mendefinisikan arsitektur yang melampaui sekadar kapasitas untuk berinteraksi. Arsitektur bio-robotik merupakan gabungan konsep biologi dan robotika; itu bergantung pada area unik dari desain yang terinspirasi secara alami dan ditambah dengan robot. Konsep ini semakin mendorong pergeseran dari paradigma mekanis ke biologis. Robotika membantu mengisi celah dalam pendekatan biomimetik yang ketat terhadap desain arsitektur. Sistem sibernetik adalah sistem yang inklusif, mencakup organisme, mesin, organisasi, dan lingkungan.

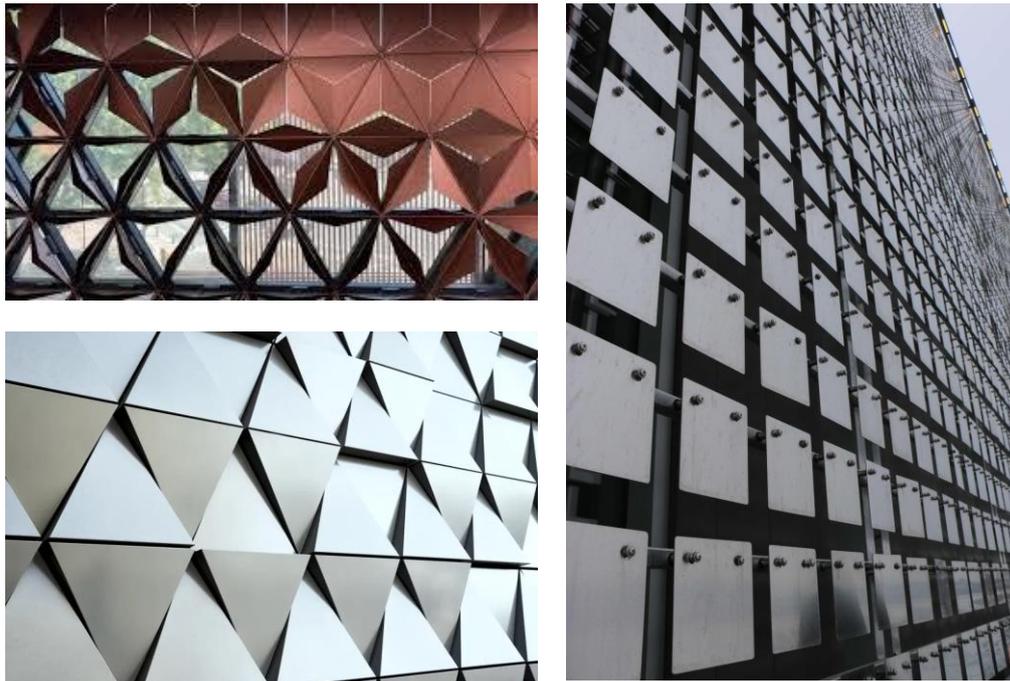




Gambar 2. Teknologi Dgiital untuk Elemen Fasade Bangunan [18]

Ketika industri bangunan mengembangkan bahan dan teknologi baru, banyak dari mereka menemukan aplikasi awal dalam selubung bangunan, yang mengarah ke evolusi tektonik yang tidak pernah berakhir dalam rekayasa fasad: curtain walls, shading systems, double skin facades, dll. Dengan kemajuan komputer perangkat keras dan perangkat lunak, building management system (BMS) yang mengontrol peralatan mekanik dan listrik di gedung-gedung menjadi biasa. Karena tujuan keseluruhan di balik penyebaran BMS adalah untuk memantau dan mengelola kebutuhan energi bangunan, jangkauannya dengan cepat meluas ke selubung bangunan saat mereka mulai memasukkan komponen kinetik yang akan mempengaruhi kinerja termal bangunan, yaitu beban panasnya.

Konsep Hybrid Modular Buildings untuk arsitektur dengan melakukan pemisahan sistem struktural yang permanen dan sistem yang mudah dilepas dan digabungkan (removable living systems) [21]. Sistem modular hybrid dapat memberikan layanan perumahan yang dinamis dan fleksibel untuk masyarakat perkotaan yang terus berubah. Sistem ini memungkinkan untuk memenuhi persyaratan struktural spesifik dari konstruksi modular hybrid, termasuk pertukaran modul secara acak dan koneksi struktural plug-in dan plug-out yang cepat antara struktur host dan modul removable. Sistem koneksi tersebut memungkinkan modul yang dapat dilepas, dipasang kembali, ditambahkan, dan dipindahkan dengan mudah.



Gambar 3. Modular Adaptif: *smart wall*, *kinetic wall*, *green wall*, *bio-robotik wall*, *parametric wall*

KESIMPULAN

Artikel ini bertujuan untuk membahas evolusi fasade rumah modular dalam beradaptasi dengan lingkungan yang dipengaruhi oleh perkembangan teknologi. Tujuan tersebut dicapai dengan memahami perbandingan: (1) perkembangan rumah modular sebelum era industrialisasi, (2) perkembangan rumah modular sebelum era industri massal, (3) perkembangan rumah modular era teknologi digital. Hasil dari perbandingan tersebut digunakan untuk menemukan elemen kunci perubahan.

Hasil kajian menemukan bahwa rumah modular adaptif-fleksibel sebenarnya bukan merupakan hal baru. Rumah modular adaptif-fleksibel sudah dikembangkan sejak arsitektur tradisional untuk hidup harmoni dengan alam. Sistem modular juga ditemukan dalam sistem pertukangan kayu dalam pembangunan rumah tinggal. Namun demikian, rumah modular arsitektur tradisional dalam beradaptasi dengan lingkungan lebih bersifat statis. Parameter digunakan dalam peancangan tidak mudah dirubah, seiring dengan perubahan lingkungan, selera pengguna, dan perubahan fungsi bangunan. Teknologi digital melalui pengelolaan data dan informasi memberikan peluang pengembangan rumah modular dan elemennya yang lebih dinamis (fleksibel), kompleks dan terintegrasi. Hal tersebut diantaranya tercermin seperti dalam konsep: *smart wall*, *kinetic wall*, *green wall*, *bio-robotik wall*, *parametric wall*. Hasil ini memberikan implikasi elemen penting pengaruh perkembangan teknologi digital terhadap rumah modular adaptif yaitu peluang pengembangan rumah modular yang lebih dinamis-fleksibel, kompleks dan terintegrasi berbasis data dan informasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Asanowicz, A. Parametric design Tool, medium or new paradigm? Proceedings of the International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2(Lee). 2017; 379–386. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2017.2.379>
- [2]. Attia, S., Lioure, R., & Declaude, Q. Future trends and main concepts of adaptive facade systems. Energy Science & Engineering, March. 2020; 1–18. <https://doi.org/10.1002/ese3.725>
- [3]. Ayu, G., Suartika, M., & Nichols, J. Reframing the Vernacular: Politics, Semiotics, and Representation. 2019. Springer.
- [4]. Carlborg, P., & Kindström, D. Service process modularization and modular strategies. Journal of Business & Industrial Marketing. 2014; 29(4), 313–323. <https://doi.org/10.1108/JBIM-08-2013-0170>
- [5]. Corbusier, L. Le Corbusier and the creative use of mathematics. 2019: BJHS, 31, 185–215.
- [6]. Creswell, J. Research Design: Qualitative, Quantitative and Mixed Methods Approaches (4th ed.). SAGE. 2014.
- [7]. Cropley, D., & Cropley, A. Elements of a Universal Aesthetic of Creativity. Psychology of Aesthetics, Creativity and Art. 2008; 2(3), 155–161. <https://doi.org/10.1037/1931-3896.2.3.155>

- [8]. Cucuzzella, C., Rahimi, N., & Soulikias, A.. The Evolution of the Architectural Façade since 1950: A Contemporary Categorization. *Architecture*. 2022; 3(1), 1–32. <https://doi.org/10.3390/architecture3010001>
- [9]. Deng, L. Quantitative Evaluation of Visual Aesthetics of Human-Machine Interaction Interface Layout. 2020.
- [10]. Doe, R. M. An open , integrated modular format : For flexible and intelligible architecture , engineering and construction design and production. *International Journal of Architectural Computing*. 2020; 00(0), 1–14. <https://doi.org/10.1177/1478077120943795>
- [11].
- [12]. Douglas, J. *Building Adaptation* (Second edi). 2006: Elsevier.
- [13]. Feigh, K. M., Dorneich, C., Laboratories, H., & Valley, G. (n.d.). Toward a Characterization of Adaptive Systems : A Framework for Researchers and System Designers. <https://doi.org/10.1177/0018720812443983>
- [14]. Gärtner, C., & Schön, O. Modularizing business models: between strategic flexibility and path dependence. *Journal of Strategy and Management*. 2016; 9(1), 39–57. <https://doi.org/10.1108/JSMA-12-2014-0096>
- [15]. Indrawan, S. E. Digital Fabrication, Architectural and Material Techniques Iwamoto, Lisa. *International Journal of Creative and Arts Studies*. 2017; 3(1), 87–91. <https://doi.org/10.24821/ijcas.v3i1.2074>
- [16]. Jutraž, A., & Moine, J. Le. Breaking out : New freedoms in urban (re) design work by adding immersive environments. 2016: <https://doi.org/10.1177/1478077116638922>
- [17]. Lehman, M. L. (n.d.). *Adaptive Sensory Environments*. Routledge.
- [18]. Matondang, A. E., Putri, A. L., & Wahyuni, D. A. *Kajian Estetika Arsitektur Fasad Pada Rumah Tinggal Desa. ARCADE*. 2021; 5(2), 198–205.
- [19]. Mayfield, A. H. B. M., Beck, S. B. M., & Mayfield, M. What is a Smart Building ? *Smart and Sustainable Built Environment*. 2015; 3(2), 92–109. <https://doi.org/10.1108/SASBE-01-2014-0003>
- [20]. Nie, J. (2022). Application of Traditional Architectural Decoration Elements in Modern Interior Design Based on 3D Virtual Imaging. 2022.
- [21]. Ostrowska-wawryniuk, K. design of sustainable DIY-oriented houses. 2 *International Journal of Architectural Computing*. 2020; 00(0), 1–15. <https://doi.org/10.1177/1478077120966496>
- [22]. Pasquale, J. Di, Ph, D., Innella, F., & Bai, Y. Structural Concept and Solution for Hybrid Modular Buildings with Removable Modules. *J. Archit. Eng.* 2020; 26(3), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000423](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000423)
- [23]. Russell, A. L. Modularity : An Interdisciplinary History of an Ordering Concept. *Information & Culture/* 2012; 47(3), 257–287. <https://doi.org/10.7560/IC47301>
- [24]. Satwiko, P., Author, C., Pintar, B., & Modular, S. Sistem Teknologi Bangunan Dan Mode Adaptif Ditengah Perubahan Lingkungan Post Pandemi Covid-19. 2022; 1(2), 79–89. <https://doi.org/10.24167/joda.v1i2.4304>
- [25]. Schmidt, R., & Austin, S. *Adaptable Architecture: Theory and practice*. 2016: Taylor & Francis Group.
- [26]. Science, E. Another way of living : The Prefabrication and modularity toward circularity in the architecture Another way of living : The Prefabrication and modularity toward circularity in the architecture. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ.* 2020; 588 042048. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/4/042048>
- [27]. Smith, R. E. *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*. In John Wiley & Sons, Inc. 2011.
- [28]. Wassim Jabi. *Parametric Design for Architecture*. Laurence King. 2013
- [29]. Wilkinson, A. Local response in health emergencies : key considerations for addressing the COVID-19 pandemic in informal urban settlements. *Environment & Urbanization*. 2020; 00(0), 1–20. <https://doi.org/10.1177/0956247820922843>
- [30]. Wilkinson, S. J. (n.d.). *Sustainable Building Adaptation*.
- [31]. Worren, N., Moore, K., & Cardona, P. Modularity, strategic flexibility, and firm performance: A study of the home appliance industry. *Strategic Management Journal*. 2002; 23(12), 1123–1140. <https://doi.org/10.1002/smj.276>