

PENDEKATAN MODULAR DALAM PERANCANGAN ARSITEKTUR SEKOLAH (STUDI KASUS SMK DI GUNUNGPATI SEMARANG)

M. Rifqi Subakti¹; Bambang Subekti²

Institut Teknologi Nasional Bandung,
Jl. PHH Mustofa No.23, Kota Bandung, Jawa Barat 40154
Email: ¹m.rifqi@mh.s.itenas.ac.id; ²bambang@itenas.ac.id

Abstrak: Fungsi bangunan sekolah harus mampu menyesuaikan diri dengan dinamika kebutuhan ruang sekaligus merespons isu keberlanjutan, sehingga pendekatan modular pada arsitektur menjadi pilihan yang semakin relevan untuk perancangan fasilitas pendidikan. Kajian ini bertujuan mengurai penerapan sistem modular berbahan kayu beserta karakteristik materialnya, dengan mengambil SMK di Gunungpati, Semarang sebagai objek studi kasus. Pendekatan kualitatif digunakan melalui telaah dokumen rancangan serta kajian pustaka. Temuan memperlihatkan bahwa sistem modular kayu tidak sekadar berperan sebagai strategi konstruksi, melainkan juga menjadi konsep desain yang menentukan tata ruang dan massa bangunan; unit-unit modul di sini bertindak layaknya grid perancangan yang membuka ruang bagi fleksibilitas serta pengembangan bangunan yang dilakukan secara bertahap. Ditinjau dari aspek material, modul kayu tergolong ringan dan efisien, sekaligus berkontribusi pada penurunan limbah konstruksi dan potensi pengurangan jejak karbon bangunan.

Kata Kunci: arsitektur modular, bangunan sekolah, modular kayu, fleksibilitas ruang, keberlanjutan.

Abstract: School facilities must accommodate shifting spatial demands while also responding to concerns around efficiency and sustainability, which has made modular architecture an increasingly relevant design strategy. This research examines the implementation of a timber-based modular system and identifies the material characteristics of timber modules through a case study of a vocational high school (SMK) in Gunungpati, Semarang. A qualitative, case-study approach was applied, drawing on design-document analysis together with a review of relevant literature. The results show that the timber modular system operates not merely as a construction method but also as a design principle that governs spatial layout and building massing, with modular units serving as a design grid that supports spatial flexibility and staged building expansion. From a material standpoint, timber modules prove lightweight and efficient, while contributing to reduced construction waste and a lower potential carbon footprint. The study concludes that timber-based modular architecture presents an adaptive, efficient, and sustainable approach to designing educational facilities.

Keywords: modular architecture, educational buildings, timber modular system, spatial flexibility, sustainability.

LATAR BELAKANG

Sebagai bagian dari sarana pendidikan, bangunan sekolah memegang peran krusial bukan hanya sebagai tempat berlangsungnya kegiatan belajar-mengajar, melainkan juga sebagai lingkungan fisik yang turut menentukan kualitas ruang, kenyamanan, dan pola interaksi para penggunanya. Di Indonesia, praktik perancangan bangunan pendidikan hingga kini masih didominasi oleh pemakaian material konvensional, yaitu beton bertulang dan komponen pracetak (*precast*), yang dipandang unggul dari sisi kekuatan struktur dan kemudahan penerapannya di lapangan. Meski demikian, pendekatan semacam ini kerap menghasilkan wujud bangunan yang kaku, sukar dikembangkan secara bertahap, dan kurang tanggap terhadap perubahan kebutuhan ruang maupun tuntutan keberlanjutan lingkungan.

Meningkatnya kepedulian terhadap efisiensi proses konstruksi serta prinsip pembangunan berkelanjutan turut mendorong berkembangnya pendekatan arsitektur modular sebagai alternatif perancangan. Prinsip dasar arsitektur modular terletak pada pemanfaatan unit bangunan yang telah distandardisasi, sehingga dapat dirakit, dilepas, maupun disusun kembali sesuai kebutuhan. Pendekatan semacam ini diyakini mampu mendorong fleksibilitas ruang, mempercepat pelaksanaan konstruksi, sekaligus menekan timbulan limbah material (Kamali & Hewage, 2016). Khusus bagi bangunan pendidikan yang fungsinya terus berubah mengikuti kebutuhan ruang yang dinamis, sistem modular menghadirkan alternatif solusi yang lebih adaptif dibandingkan metode konstruksi konvensional.

Salah satu arah pengembangan arsitektur modular ialah pemanfaatan kayu sebagai bahan dasar modul atau blok yang telah distandardisasi. Sifat kayu yang ringan, dapat

diperbarui, dan relatif lebih ramah lingkungan dibandingkan beton menjadikannya pilihan menarik. Di samping itu, modul berbahan kayu memungkinkan pelaksanaan konstruksi yang lebih efisien dan luwes, serta berpotensi diintegrasikan secara baik dengan karakter iklim tropis. Rasio kekuatan terhadap bobotnya yang tinggi juga menjadikan kayu berkontribusi pada penurunan emisi karbon bangunan (Ramage et al., 2017). Kendati demikian, penerapan sistem modular kayu pada bangunan pendidikan di Indonesia masih tergolong minim dan belum banyak menjadi objek kajian akademik secara mendalam.

Presisi dimensi menjadi syarat yang tidak bisa ditawar dalam sistem modular, sebab kesalahan sekecil apa pun pada satu unit akan terus berakumulasi seiring pengulangan penyusunan modul. Hal ini yang mendorong pemanfaatan teknologi digital untuk kepentingan pengendalian mutu maupun pemantauan jalannya konstruksi. Mihić dkk. (2023) menelaah peluang penggunaan data pemindaian tiga dimensi (*3D scan*) dalam manajemen konstruksi terutama untuk pemantauan progres dan kendali mutu sembari mencatat bahwa penerapannya di lapangan masih rendah akibat terbatasnya solusi teknis dan kesiapan industri. Merujuk pada konteks bangunan modular kayu di Indonesia, temuan ini mengindikasikan bahwa peluang peningkatan presisi lewat teknologi digital sesungguhnya masih terbuka lebar, meski penerapannya pada proyek berskala menengah seperti bangunan sekolah masih terkendala ketersediaan perangkat dan sumber daya manusia.

SMK di Kota Semarang, tepatnya di kawasan Gunungpati, menjadi salah satu contoh nyata penerapan pendekatan arsitektur modular, dengan blok kayu sebagai elemen utama pembentuk bangunannya. Perancangan proyek ini mempertimbangkan sejumlah faktor, mulai dari kondisi tapak yang berbukit, iklim tropis yang lembap, hingga kebutuhan ruang sekolah yang berpotensi berkembang secara bertahap. Penerapan sistem modular kayu pada bangunan ini tidak semata berfungsi sebagai jalan keluar dari sisi konstruksi, tetapi juga menjadi strategi perancangan yang berorientasi pada fleksibilitas ruang, efisiensi pembangunan, dan keberlanjutan bangunan itu sekaligus.

Selain menjawab kebutuhan efisiensi konstruksi, pendekatan modular juga semakin relevan seiring meningkatnya tuntutan pembangunan fasilitas pendidikan yang adaptif terhadap perubahan kebutuhan pengguna. Bangunan sekolah pada dasarnya merupakan fasilitas publik yang memiliki umur layanan panjang, namun kebutuhan ruang di dalamnya dapat berubah akibat perkembangan kurikulum, perubahan metode pembelajaran, maupun bertambahnya jumlah peserta didik. Oleh karena itu, pendekatan perancangan yang mampu mengakomodasi perubahan tanpa memerlukan pembongkaran besar menjadi salah satu pertimbangan penting dalam mewujudkan bangunan pendidikan yang berkelanjutan. Dalam konteks tersebut, sistem modular menawarkan fleksibilitas melalui penggunaan unit-unit yang terstandarisasi sehingga memungkinkan proses pengembangan bangunan dilakukan secara bertahap sesuai kebutuhan. Pendekatan ini tidak hanya memberikan keuntungan dari sisi efisiensi konstruksi, tetapi juga mendukung optimalisasi penggunaan sumber daya dan meminimalkan dampak lingkungan selama siklus pembangunan.

TINJAUAN PUSTAKA

Konsep Arsitektur Modular

Arsitektur modular dapat dipahami sebagai suatu pendekatan perancangan dan konstruksi yang bertumpu pada pemanfaatan unit bangunan terstandar (modul), diproduksi secara berulang, lalu dirangkai menjadi satu kesatuan bangunan utuh. Standardisasi, repetisi, dan koordinasi dimensi menjadi prinsip dasar dari pendekatan ini, sehingga tiap modul dapat dipertukarkan, disusun kembali, bahkan ditambah tanpa mengubah keseluruhan sistem bangunan. Menurut Smith dkk. (2010), prefabrikasi dan modularitas bukan semata metode memproduksi komponen, melainkan sebuah pola pikir arsitektural yang mengalihkan sebagian besar pekerjaan konstruksi dari lokasi proyek menuju lingkungan produksi yang lebih

terkendali. Peralihan tersebut membawa dampak berupa peningkatan presisi, berkurangnya durasi pekerjaan lapangan, serta minimalnya gangguan terhadap lingkungan di sekitar tapak.

Dalam perjalanannya, arsitektur modular berkembang menjadi sistem yang beroperasi pada berbagai tingkatan sekaligus mulai dari modul komponen (component-based), modul panel (panelized), sampai modul volumetrik (volumetric modular). Lawson dkk. (2012) menyatakan bahwa konstruksi modular volumetrik sanggup memangkas waktu pengerjaan proyek hingga setengahnya dibandingkan metode konvensional, sekaligus memperkuat kendali mutu karena proses produksinya berlangsung di lingkungan pabrik. Kamali dan Hewage (2016) menambahkan bahwa nilai lebih konstruksi modular tidak hanya terlihat dari sisi kecepatan, melainkan juga kinerja lingkungannya sepanjang siklus hidup bangunan, terutama lewat pengurangan limbah material dan konsumsi energi selama proses konstruksi. Kendati begitu, Bertram dkk. (2019) mencatat bahwa adopsi konstruksi modular masih terganjal sejumlah hambatan, seperti persepsi pasar, keterbatasan rantai pasok, hingga kebutuhan investasi awal untuk fasilitas produksi.

Di sisi lain, dari perspektif perancangan, modularitas sering dianggap berisiko melahirkan bangunan yang terkesan monoton dan seragam. Akan tetapi, Gibb dan Isack (2003) memperlihatkan bahwa keberhasilan penerapan sistem modular sangat ditentukan oleh sejauh mana modul telah dirumuskan sejak tahap konsep desain, bukan sekadar disisipkan sebagai penyesuaian teknis pada tahap akhir. Apabila modul diposisikan sebagai grid perancangan, keteraturan yang muncul justru berpeluang menjadi instrumen komposisi ruang dan fasad, sehingga variasi arsitektural tetap dapat diperoleh melalui permutasi susunan modul, perbedaan bukaan, maupun pengolahan ruang antara.

Material Kayu dalam Sistem Modular

Sebagai material konstruksi yang dapat diperbarui, kayu memiliki rasio kekuatan terhadap bobot yang tergolong tinggi, sehingga cocok diterapkan pada sistem bangunan yang menuntut keringanan sekaligus kemudahan perakitan.

Ramage dkk. (2017) menjelaskan bahwa pemanfaatan kayu dalam konstruksi berpotensi besar menurunkan emisi karbon bangunan, terutama karena kayu menyimpan karbon selama masa pakainya dan hanya membutuhkan energi produksi yang jauh lebih rendah dibandingkan beton ataupun baja. Potensi ini diperkuat oleh Churkina dkk. (2020), yang memperkirakan bahwa pengalihan sebagian bangunan perkotaan menuju konstruksi berbasis kayu dapat menjadikan bangunan tersebut sebagai penyimpan karbon, alih-alih penghasil emisi.

Kemajuan teknologi kayu rekayasa (engineered wood) turut memperluas peluang penerapan kayu pada bangunan bertingkat maupun fasilitas publik. Brandner dkk. (2016) menerangkan bahwa cross-laminated timber (CLT) memiliki stabilitas dimensi dan kapasitas struktural yang memadai untuk digunakan sebagai elemen dinding maupun pelat lantai, sehingga membuka peluang pemakaian kayu di luar bangunan hunian berskala kecil. Khusus dalam konteks Indonesia, ketersediaan kayu rakyat berkelas kuat II dan III menjadi pertimbangan penting, sebab sistem modular memungkinkan pemanfaatan kayu berdimensi kecil lewat proses laminasi maupun penyusunan blok, sehingga keterbatasan dimensi bahan baku dapat diatasi tanpa mengorbankan kinerja struktur secara keseluruhan.

Gosselin dkk. (2018) menegaskan bahwa keberhasilan penerapan struktur kayu pada suatu proyek konstruksi sangat bergantung pada kolaborasi lintas pihak sejak tahap awal, mengingat sistem berbahan kayu menuntut ketelitian detail sambungan serta koordinasi antar-disiplin yang lebih tinggi dibandingkan sistem konvensional. Di sisi lain, Hurmekoski dkk. (2015) mengungkapkan bahwa hambatan utama pemakaian kayu pada bangunan bukan berasal dari faktor teknis, melainkan berkaitan dengan regulasi, persepsi risiko kebakaran, dan kebiasaan yang berlaku di industri konstruksi. Khusus pada iklim tropis lembap, Zabalza Bribián dkk. (2011) mengingatkan bahwa keunggulan lingkungan dari material kayu hanya dapat

dipertahankan apabila disertai perlindungan terhadap kelembapan, serangan rayap, dan paparan air hujan, melalui strategi detail arsitektural yang tepat.

Bangunan Pendidikan dan Kebutuhan Fleksibilitas Ruang

Kebutuhan ruang pada bangunan pendidikan bersifat dinamis, mengikuti perubahan kurikulum, jumlah peserta didik, maupun metode pembelajaran yang diterapkan. Melalui studi terhadap sejumlah ruang kelas, Barrett dkk. (2015) menemukan bahwa kualitas lingkungan fisik termasuk fleksibilitas dan kesesuaian ruang terhadap jenis aktivitas memberi pengaruh yang dapat diukur terhadap capaian belajar siswa. Temuan tersebut menegaskan bahwa fleksibilitas ruang bukan sekadar nilai tambah, melainkan kebutuhan mendasar dalam merancang bangunan sekolah. Sejalan dengan hal itu, Woolner dkk. (2007) turut menyimpulkan bahwa lingkungan belajar yang dapat menyesuaikan diri terhadap beragam pola kegiatan cenderung lebih mendukung keterlibatan siswa dibandingkan ruang kelas dengan konfigurasi yang tetap.

Kebutuhan ini sejalan dengan konsep open building yang diperkenalkan Kendall (1999), yang membagi sistem bangunan menjadi lapisan berumur panjang (support) dan lapisan yang bersifat dapat berubah (infill). Dalam kerangka tersebut, sistem modular berfungsi sebagai mekanisme yang memungkinkan terjadinya perubahan pada lapisan pengisi tanpa perlu membongkar struktur utama bangunan. Pendekatan semacam ini relevan diterapkan pada sekolah kejuruan, mengingat program ruangnya sangat dipengaruhi kebutuhan bengkel dan laboratorium praktik, sehingga bangunan dituntut mampu tumbuh secara bertahap seiring ketersediaan anggaran maupun perkembangan program keahlian.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini mengambil pendekatan kualitatif dengan metode studi kasus. Pemilihan pendekatan kualitatif didasari oleh fokus penelitian yang menekankan pemahaman mendalam atas konsep, proses perancangan, serta penerapan sistem modular dalam konteks arsitektur bangunan pendidikan. Metode studi kasus dipilih karena memungkinkan pengkajian yang spesifik dan kontekstual terhadap satu objek penelitian, sehingga karakteristik desain, material, maupun sistem konstruksinya dapat ditelaah secara menyeluruh.

Objek yang diteliti adalah sebuah SMK di kawasan Gunungpati, Kota Semarang, Jawa Tengah. Bangunan ini dipilih sebab menerapkan pendekatan arsitektur modular melalui pemakaian blok kayu modular sebagai elemen pembentuk utama bangunannya. Karakteristik lokasi yang berupa topografi berbukit serta iklim tropis lembap menjadikannya relevan untuk mengevaluasi sejauh mana sistem modular kayu sesuai dengan kondisi lingkungan sekaligus kebutuhan bangunan pendidikan.

Fokus kajian diarahkan pada analisis penerapan konsep arsitektur modular dalam perancangan bangunan sekolah, serta karakteristik material modular blok kayu sebagai alternatif dari material konvensional seperti beton dan *precast*. Data dihimpun melalui tiga cara: studi dokumen, studi literatur, dan observasi tidak langsung. Studi dokumen meliputi penelaahan gambar arsitektur, dokumentasi rancangan, serta dokumen perencanaan bangunan SMK di Gunungpati, Semarang. Studi literatur ditempuh dengan mengkaji jurnal ilmiah, buku, dan publikasi yang berkaitan dengan arsitektur modular, material kayu, bangunan pendidikan, serta arsitektur berkelanjutan. Sementara itu, observasi tidak langsung dilaksanakan melalui analisis visual atas konfigurasi ruang, sistem modular, dan keterkaitan antar elemen bangunan, berdasarkan dokumentasi yang tersedia.

Data yang terkumpul kemudian diolah dengan analisis deskriptif-kualitatif. Tahapannya mencakup identifikasi konsep modular yang diterapkan pada desain SMK di Gunungpati, Semarang; analisis sistem modular blok kayu dari sisi material, konstruksi, dan penataan ruang; serta perbandingan konseptual antara sistem modular kayu dengan sistem konstruksi konvensional seperti beton dan *precast*. Setelah itu, dilakukan interpretasi atas implikasi desain yang berkaitan dengan fleksibilitas ruang, efisiensi konstruksi, dan keberlanjutan bangunan

sekolah. Hasil analisis dipaparkan secara naratif-interpretatif guna memberi pemahaman yang utuh mengenai peran pendekatan modular dalam perancangan arsitektur sekolah.

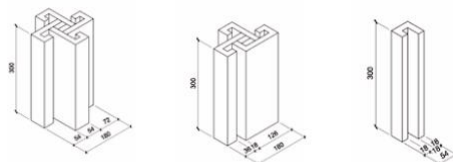
Cakupan penelitian ini dibatasi pada aspek perancangan arsitektur dan sistem modular bangunan semata. Pengujian struktural secara teknis maupun perhitungan biaya konstruksi secara kuantitatif berada di luar cakupan analisis, karena kajian ini difokuskan pada aspek konseptual dan penerapan desain berdasarkan data kualitatif yang tersedia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

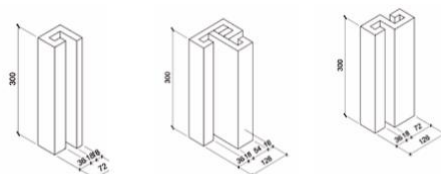
Analisis Penerapan Sistem Modular Berbasis Kayu

Pada proyek Hepta Desain, penerapan sistem modular berbahan kayu pada bangunan SMK di Gunungpati memperlihatkan bahwa pendekatan modular tidak sekadar berfungsi sebagai strategi konstruksi, melainkan juga sebagai konsep perancangan arsitektural yang membentuk tata ruang dan sistem bangunan secara menyeluruh. Merujuk pada analisis desain, bangunan sekolah ini terbentuk dari unit-unit modular kayu yang disusun secara repetitif dan sistematis, sehingga memungkinkan terbentuknya ruang kelas, koridor, dan ruang komunal dengan pola yang konsisten namun tetap luwes. Pola repetisi modul ini menghadirkan keteraturan ruang sekaligus membuka peluang adaptasi terhadap perubahan kebutuhan fungsi pendidikan.

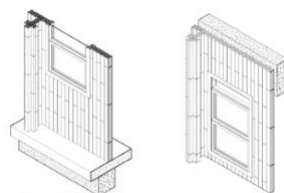
Penggunaan modul kayu tidak semata menentukan dimensi ruang, tetapi juga menjadi landasan pengorganisasian massa bangunan. Modul di sini berperan sebagai grid desain yang mengatur ritme fasad, proporsi ruang, dan hubungan antar-ruang, sehingga sistem modular tidak berhenti pada aspek teknis konstruksi semata, melainkan berkembang menjadi perangkat perancang ruang. Kondisi ini sejalan dengan konsep arsitektur modular yang menitikberatkan pemakaian unit terstandar guna meningkatkan efisiensi konstruksi sekaligus memungkinkan pengembangan bangunan secara bertahap (Smith et al., 2010). Pada kasus SMK Gunungpati, modularitas dimanfaatkan sebagai sistem yang memungkinkan bangunan berkembang secara bertahap tanpa mengganggu struktur utama maupun aktivitas belajar-mengajar.



Gambar 1. Modular Woodblock Kolom
Sumber: Dokumen Hepta, 2025



Gambar 2. Modular Woodblock Dinding
Sumber: Dokumen Hepta, 2025



Gambar 3. Susunan Modular Woodblock
Sumber: Dokumen Hepta, 2025

Di samping itu penerapan sistem modular kayu juga berkaitan erat dengan kondisi tapak yang berkontur berbukitan. Sistem modular memungkinkan bangunan disusun mengikuti kontur lahan, sehingga menekan kebutuhan pekerjaan *cut and fill* berskala besar dan tetap menjaga karakter alami tapak. Hal ini memperlihatkan bahwa modularitas berfungsi sebagai strategi adaptasi terhadap tapak, bukan semata sebagai upaya efisiensi konstruksi. Jika dibandingkan dengan bangunan sekolah konvensional berbasis beton yang umumnya membutuhkan struktur masif dan perataan lahan, sistem modular kayu menghadirkan pendekatan yang lebih ringan dan responsif terhadap kondisi eksisting tapak.

Hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa modularitas pada bangunan SMK Gunungpati tidak hanya diterapkan sebagai metode konstruksi, tetapi telah menjadi dasar dalam proses pengambilan keputusan desain sejak tahap awal perancangan. Penentuan ukuran modul memengaruhi pembentukan ruang, pola sirkulasi, ritme fasad, hingga kemungkinan pengembangan bangunan di masa mendatang. Dengan demikian, sistem modular pada studi kasus ini tidak berfungsi sebagai elemen tambahan setelah desain selesai disusun, melainkan menjadi kerangka utama yang mengintegrasikan aspek arsitektural, konstruksi, dan kebutuhan fungsional bangunan pendidikan secara bersamaan. Pendekatan tersebut menunjukkan bahwa penerapan modularitas mampu menghasilkan bangunan yang lebih adaptif terhadap perubahan tanpa mengurangi kualitas ruang maupun karakter arsitekturnya.



Gambar 4. SMK Setiabudhi
Sumber: Dokumen Hepta, 2025

Identifikasi Karakteristik Material Modular Berbasis Kayu

Ditinjau dari sisi material, pemakaian modul kayu pada SMK di Gunungpati menampilkan karakteristik yang berbeda dari material konvensional seperti beton dan precast. Modul kayu yang dipakai bersifat ringan, mudah dirakit, dan cukup kuat karena menggunakan kayu kelas 2 dan 3, sehingga memungkinkan proses konstruksi yang lebih cepat dan luwes. Karakteristik ini selaras dengan temuan Gosselin dkk. (2018), yang menyatakan bahwa bangunan modular berbahan kayu unggul dalam hal efisiensi waktu konstruksi, kemudahan perakitan, serta pengurangan kompleksitas pekerjaan di lapangan. Pada kasus SMK Gunungpati, modul kayu tidak hanya berfungsi sebagai elemen struktur, tetapi juga sebagai pembentuk ruang dan fasad, sehingga memperkuat keterpaduan antara sistem konstruksi dan ekspresi arsitekturnya.



Gambar 5. Konstruksi Modular *Woodblock*
Sumber: Dokumen Hepta, 2025



Gambar 6. Hasil Konstruksi
Sumber: Dokumen Hepta, 2025

Karakteristik modul kayu turut membuka peluang efisiensi material dan pengurangan limbah konstruksi. Proses perakitan yang terkontrol dan bersifat modular memungkinkan pemakaian material secara lebih presisi sekaligus meminimalkan sisa material di lapangan. Hal ini semakin memperkuat peran modul kayu sebagai material yang mendukung prinsip konstruksi berkelanjutan. Sejalan dengan temuan Ramage dkk. (2017), pemanfaatan kayu sebagai material utama bangunan berpotensi menurunkan jejak karbon dibandingkan material konvensional seperti beton dan baja, sekaligus mendukung pendekatan pembangunan yang lebih ramah lingkungan.



Gambar 7. Tampilan Modular *Woodblock*
Sumber: Dokumen Hepta, 2025

Fleksibilitas Ruang dan Potensi Pengembangan Bertahap

Salah satu implikasi paling nyata dari penerapan sistem modular kayu pada SMK di Gunungpati adalah terbukanya peluang pengembangan bangunan secara bertahap. Ruang kelas dan ruang penunjang disusun mengikuti kelipatan modul yang sama, sehingga penambahan unit baru cukup dilakukan dengan mengulang modul yang sudah ada, tanpa perlu merancang ulang sistem struktur. Karakter ini sejalan dengan prinsip *open building* yang dikemukakan Kendall (1999), yang memisahkan elemen bangunan berumur panjang dari elemen yang dapat berubah, sehingga perubahan pada satu lapisan tidak menuntut pembongkaran pada lapisan lainnya. Pada bangunan sekolah kejuruan yang program ruangnya terus berkembang seiring pembukaan program keahlian baru, kemampuan tumbuh secara bertahap semacam ini memiliki nilai strategis tersendiri, terutama saat pembangunan dilakukan dalam beberapa tahap anggaran.

Fleksibilitas juga tampak pada tataran ruang dalam. Sebab dinding pembatas antar-ruang tersusun dari modul *woodblock* yang sifatnya menumpuk dan tidak seluruhnya memikul beban utama, sebagian partisi berpeluang dipindahkan atau dibongkar guna menggabungkan dua ruang kelas menjadi satu ruang praktik berukuran lebih besar. Kemungkinan ini menjawab temuan Barrett dkk. (2015) tentang pentingnya kesesuaian ruang terhadap aktivitas belajar, sekaligus pengamatan Woolner dkk. (2007) bahwa lingkungan belajar yang adaptif cenderung lebih mendukung keterlibatan siswa. Dengan demikian, modularitas pada kasus ini tidak berhenti sebagai bentuk efisiensi konstruksi semata, melainkan menjadi prasyarat teknis bagi terwujudnya ruang belajar yang mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan metode pembelajaran.

Perbandingan Konseptual dengan Sistem Konvensional

Perbandingan konseptual antara sistem modular kayu pada SMK Gunungpati dengan sistem beton bertulang dan precast menunjukkan perbedaan mendasar pada logika pembentukan bangunannya. Sistem beton bertulang bersifat monolit dan dicetak langsung di lokasi, sehingga bentuk yang sudah terbangun sukar diubah, dan setiap penambahan menuntut pekerjaan struktur baru yang turut mengganggu kegiatan belajar-mengajar. Sistem precast sesungguhnya sudah memperkenalkan repetisi dan produksi di luar tapak, tetapi bobot komponennya menuntut alat berat, akses jalan yang memadai, serta lahan yang relatif datar. Pada tapak berkontur seperti Gunungpati, persyaratan tersebut akan berujung pada pekerjaan cut and fill yang luas. Sebaliknya, modul kayu yang ringan memungkinkan proses pengangkutan dan perakitan hanya dengan tenaga manusia, sehingga bangunan dapat mengikuti kontur lahan melalui penyesuaian ketinggian pondasi setempat.

Perbedaan ini juga terlihat pada aspek siklus hidup bangunan. Kamali dan Hewage (2016) memperlihatkan bahwa keunggulan lingkungan dari bangunan modular terletak pada berkurangnya limbah konstruksi serta terbukanya peluang pemanfaatan kembali komponen pada akhir masa layan bangunan. Pada sistem beton, proses pembongkaran umumnya hanya menyisakan puing dengan nilai guna rendah, sementara modul kayu yang tersambung secara mekanis justru berpeluang untuk dilepas dan dipakai kembali. Potensi ini semakin memperkuat argumen Churkina dkk. (2020) tentang peran bangunan kayu sebagai penyimpan karbon jangka panjang. Meski demikian, keunggulan tersebut tidak serta-merta terjadi begitu saja; sebagaimana diingatkan Hurmekoski dkk. (2015), hambatan regulasi dan persepsi risiko kebakaran masih menjadi tantangan tersendiri, sehingga penerapan sistem modular kayu pada bangunan pendidikan tetap menuntut kejelasan standar teknis serta pembuktian kinerja keselamatan bangunan.

Dalam konteks iklim tropis lembap, keunggulan konseptual sistem modular kayu perlu diimbangi dengan kecermatan pada detail teknis. Zabalza Bribián dkk. (2011) menegaskan bahwa kinerja lingkungan suatu material hanya bisa dipertahankan apabila material tersebut mampu mencapai umur layan yang telah direncanakan. Karena itu, strategi perlindungan seperti overstek atap yang lebar, peninggian lantai dari muka tanah, pengawetan kayu, serta detail sambungan yang memungkinkan proses pengeringan menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari sistem modular yang diterapkan. Hal ini memperlihatkan bahwa modularitas dan respons terhadap iklim bukanlah dua persoalan yang berdiri sendiri, melainkan saling menentukan keberhasilan bangunan dalam jangka panjang.

Secara keseluruhan, hasil perbandingan menunjukkan bahwa pemilihan sistem konstruksi tidak hanya dipengaruhi oleh pertimbangan kekuatan struktur, tetapi juga oleh kebutuhan fleksibilitas, efisiensi pembangunan, serta karakteristik lokasi proyek. Pada kawasan dengan kondisi topografi yang beragam seperti Gunungpati, sistem modular berbahan kayu menawarkan alternatif yang lebih responsif dibandingkan sistem konvensional karena mampu beradaptasi terhadap kondisi tapak tanpa memerlukan pekerjaan tanah yang berlebihan. Dengan demikian, penerapan modularitas berbasis kayu memiliki potensi untuk menjadi salah satu pendekatan yang relevan dalam pengembangan fasilitas pendidikan di Indonesia.

Implikasi Perancangan dan Keterbatasan Sistem

Temuan pada studi kasus ini membawa sejumlah implikasi bagi perancangan bangunan pendidikan di Indonesia. Pertama, penetapan dimensi modul semestinya dilakukan sejak tahap konsep, sebab modul yang baru dirumuskan pada tahap akhir cenderung hanya menjadi penyesuaian teknis dan kehilangan potensinya sebagai alat perancang ruang. Hal ini menegaskan kembali pengamatan Gibb dan Isack (2003) bahwa keberhasilan pra-perakitan sangat bergantung pada keterlibatan keputusan modular sejak awal proses desain. Kedua, dimensi modul sebaiknya diturunkan dari kebutuhan ruang kelas standar, dengan tetap

mempertimbangkan batas berat yang masih dapat diangkat tanpa alat berat, agar keunggulan sistem pada tapak berkontur benar-benar dapat terwujud.

Sistem modular menuntut perancangan sambungan yang bersifat dapat dilepas kembali (*reversible*). Sambungan mekanis seperti baut dan pen kayu memungkinkan modul untuk dibongkar dan disusun ulang, sementara sambungan permanen berbasis perekat justru akan menghilangkan keunggulan adaptabilitas sistem tersebut. Konsekuensi ini berkaitan langsung dengan potensi bangunan sebagai penyimpan karbon jangka panjang sebagaimana dikemukakan Churkina dkk. (2020), sebab nilai lingkungan dari kayu baru benar-benar terealisasi apabila materialnya dapat dimanfaatkan kembali setelah masa layan bangunan berakhir.

Di sisi lain, sistem modular kayu pada kasus ini juga memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu dicermati. Ketergantungan pada ketersediaan kayu kelas II dan III menuntut kepastian rantai pasok serta pengendalian mutu bahan baku, yang menurut Bertram dkk. (2019) menjadi salah satu hambatan utama dalam adopsi konstruksi modular secara lebih luas. Selain itu, kajian ini belum mencakup pengujian struktural maupun perhitungan biaya secara kuantitatif, sehingga klaim mengenai efisiensi yang diajukan masih bersifat konseptual dan memerlukan verifikasi lebih lanjut. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengukur kinerja termal ruang kelas, melakukan evaluasi pasca-huni, serta menganalisis biaya siklus hidup, guna menguji sejauh mana keunggulan sistem modular kayu dapat dipertahankan dalam konteks operasional bangunan pendidikan di Indonesia.

KESIMPULAN

Penerapan sistem modular berbahan kayu pada bangunan SMK Gunungpati memperlihatkan bahwa pendekatan modular tidak sekadar berfungsi sebagai strategi konstruksi, melainkan juga sebagai konsep perancangan arsitektural yang membentuk tata ruang, massa bangunan, dan sistem bangunan secara menyeluruh. Unit-unit modular kayu yang disusun secara repetitif menjadi dasar terbentuknya ruang kelas, koridor, dan ruang komunal dengan pola yang konsisten namun tetap fleksibel, sehingga memungkinkan terjadinya adaptasi terhadap perubahan kebutuhan fungsi pendidikan. Modularitas pada bangunan ini berfungsi sebagai grid desain yang mengatur dimensi ruang, ritme fasad, serta hubungan antar-ruang, sekaligus membuka peluang pengembangan bangunan secara bertahap tanpa mengganggu struktur utama maupun aktivitas belajar-mengajar.

Dari sisi material, modul kayu menampilkan karakteristik yang berbeda dibandingkan material konvensional seperti beton dan precast. Sifatnya yang ringan, mudah dirakit, dan cukup kuat (menggunakan kayu kelas 2 dan 3) memungkinkan proses konstruksi yang lebih cepat, efisien, serta adaptif terhadap kondisi tapak berbukit. Modul kayu tidak hanya berperan sebagai elemen struktur, tetapi juga sebagai pembentuk ruang dan fasad, sehingga terjadi keterpaduan antara sistem konstruksi dan ekspresi arsitektur. Di samping itu, sistem modular kayu turut mendukung efisiensi material, pengurangan limbah konstruksi, serta potensi penurunan jejak karbon bangunan, sehingga menjadikannya alternatif material yang relevan bagi pengembangan bangunan pendidikan yang adaptif, berkelanjutan, dan kontekstual.

SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, pendekatan arsitektur modular berbasis kayu memiliki potensi untuk diterapkan lebih luas pada perancangan bangunan pendidikan di Indonesia, khususnya pada kawasan yang memiliki kondisi topografi menantang atau membutuhkan fleksibilitas pengembangan ruang di masa mendatang. Agar penerapannya dapat berjalan secara optimal, perancangan sistem modular sebaiknya telah dipertimbangkan sejak tahap awal desain dengan memperhatikan aspek standarisasi modul, kualitas material, detail sambungan, serta kesesuaiannya terhadap kondisi iklim dan lingkungan setempat.

Selain itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk melengkapi kajian ini melalui analisis yang lebih komprehensif, seperti pengujian kinerja struktural, analisis biaya konstruksi dan biaya siklus hidup (life cycle cost), evaluasi pasca-huni (post-occupancy evaluation), serta pengukuran dampak lingkungan secara kuantitatif. Dengan demikian, manfaat penerapan sistem modular berbahan kayu tidak hanya dapat dikaji dari aspek konseptual dan perancangan, tetapi juga didukung oleh bukti empiris yang lebih kuat sebagai dasar pengembangan bangunan pendidikan yang adaptif, efisien, dan berkelanjutan

DAFTAR PUSTAKA

- Barrett, P., Davies, F., Zhang, Y., & Barrett, L. (2015). The impact of classroom design on pupils' learning: Final results of a holistic, multi-level analysis. *Building and Environment*, 89, 118–133. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.013>
- Bertram, N., Fuchs, S., Mischke, J., Palter, R., Strube, G., & Woetzel, J. (2019).
- Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., & Thiel, A. (2016). Cross laminated timber (CLT): Overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3), 331–351. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>
- Churkina, G., Organschi, A., Reyser, C. P. O., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B. K., Graedel, T. E., & Schellnhuber, H. J. (2020). Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability*, 3(4), 269–276. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>
- Collaboration enables innovative timber structure adoption in construction. *Buildings*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/buildings8120183>
- Context, drivers, and future potential for wood-frame multi-story construction in Europe. *Technological Forecasting and Social Change*, 99, 181–196. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.002>
- Gibb, A. G. F., & Isack, F. (2003). Re-engineering through pre-assembly: Client expectations and drivers. *Building Research & Information*, 31(2), 146–160. <https://doi.org/10.1080/09613210302000>
- Gosselin, A., Blanchet, P., Lehoux, N., & Cimon, Y. (2018).
- Hurmekoski, E., Jonsson, R., & Nord, T. (2015).
- Kamali, M., & Hewage, K. (2016). Life cycle performance of modular buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1171–1183. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.031>
- Kendall, S. (1999). Open building: An approach to sustainable architecture. *Journal of Urban Technology*, 6(3), 1–16. <https://doi.org/10.1080/10630739983551>
- Lawson, R. M., Ogden, R. G., & Bergin, R. (2012). Application of modular construction in high-rise buildings. *Journal of Architectural Engineering*, 18(2), 148–154. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000057](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000057)
- Mihić, M., Sigmund, Z., Završki, I., & Butković, L. L. (2023). An Analysis of Potential Uses, Limitations and Barriers to Implementation of 3D Scan Data for Construction Management-Related Use—Are the Industry and the Technical Solutions Mature Enough for Adoption? *Buildings*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/buildings13051184>
- Modular construction: From projects to products. McKinsey & Company.
- Ramage, M. H., Burrige, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P. F., & Scherman, O. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 68, pp. 333–359). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>
- Smith, R. E., Timberlake, J., & Smith, F. (2010). *Prefab Architecture*. www.itac.utah.edu

- Woolner, P., Hall, E., Higgins, S., McCaughey, C., & Wall, K. (2007). A sound foundation? What we know about the impact of environments on learning and the implications for Building Schools for the Future. *Oxford Review of Education*, 33(1), 47–70. <https://doi.org/10.1080/03054980601094693>
- Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., & Aranda Usón, A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(5), 1133–1140. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>