

ARCHITECTURE
ARCHITEKTURA

ALEKSANDER JANICKI

MSc

Cracow University of Technology

Faculty of Architecture

e-mail: aleksander.janicki@doktorant.pk.edu.pl

ORCID: orcid.org/0000-0003-4416-0770

APPLICATION OF GLUED LAMINATED TIMBER STRUCTURES IN OFFICE BUILDINGS

O ZASTOSOWANIU DREWNIANYCH KONSTRUKCJI KLEJONYCH W BUDYNKACH BIUR

ABSTRACT

Due to the ongoing climate change, the issues currently in focus are the reduction of CO₂ emissions into the atmosphere and sustainable construction. The search for ecological alternatives to traditional building structures that will reduce a building's carbon footprint seems to be a desirable direction of modern construction development. At present, the first projects of office buildings that use cross-laminated timber as the main construction material are being completed, which can have a positive impact not only on the environment but also on the users of the building.

Keywords: carbon dioxide emissions, sustainable construction, glued laminated timber, office building

STRESZCZENIE

Zmniejszenie emisji CO₂ do atmosfery oraz budownictwo zrównoważone są obecnie zagadnieniami kluczowymi ze względu na postępujące zmiany klimatyczne. Poszukiwanie ekologicznych alternatyw dla tradycyjnych konstrukcji budynków, dzięki którym ślad węglowy będzie mniejszy, wydaje się pożądanym kierunkiem rozwoju współczesnego budownictwa. Powstają obecnie pierwsze realizacje budynków biurowych wykorzystujące jako główny materiał konstrukcyjny drewno klejone. Mogą one wpływać korzystnie nie tylko na środowisko, ale również na użytkowników obiektu.

Słowa kluczowe: emisja dwutlenku węgla, budownictwo zrównoważone, drewno klejone, budynek biurowy

1. INTRODUCTION

The European Climate Law (2021; entered into force on 29 July 2021) that was adopted by the European Parliament in July 2021 set a very ambitious objective for the members of the Community — a 55% reduction of greenhouse gas emissions by 2030 and the attainment of climate neutrality by all Member States by 2050. To achieve this, radical changes must be implemented. The construction sector is one of the main sources of CO₂ emissions. It is estimated

that the construction sector is responsible for approximately 28% of the global CO₂ emission into the atmosphere, while a branch of business related to the production of construction materials such as steel, cement, or aluminium is responsible for the additional 11% (International Energy Agency and United Nations Environmental Programme, 2018, p. 31). The application of alternative materials that emit lower levels of CO₂ during the production process and are reusable is a desirable direction for the development of modern construction. Modern glued

timber technologies that enable the construction of buildings with a lower carbon footprint and aim at ecological solutions and users' comfort are an example of such solutions.

Aim of the study

This study aims to broaden the knowledge of applying newly developed glued timber structures in architecture based on the examples of completed office buildings. The main purpose is to analyse the existing condition, while the knowledge gained in this regard will be the formulation of conclusions and compare the completed constructions with traditionally built constructions in terms of environmental, aesthetic and sensibility aspects, time of execution, and comfort.

Methods

The study used the methods of logical reasoning, comparative analysis, and the multiple-case study. The study material was mainly based on the available academic and trade literature, and materials disclosed by design studios responsible for the construction of each investigated building.

Scope

The subject matter of glued timber technology used in office buildings is relatively new. The main scope of the problem covers construction issues related to buildings completed with modern glued timber or hybrid technologies, which mainly function in office buildings. Facilities of this type were analysed, and the adopted architectural solutions were briefly outlined. Conclusions were drawn regarding, i.a., the buildings' impact on the environment, the users' comfort, the spatial solutions applied, and the way of forming buildings.

Literature review

The paper focuses on the topic of office buildings completed with the use of advanced glued timber technology. The issues related to the technology are discussed in general (Borysiuk, Kozakiewicz and Krzosek, 2019; Średniawa, 2021; Karacabeyli and Gagnon, 2019), whereas few studies show the first buildings, applied technologies, and their impact on building forms (Green and Taggart, 2020; Crawley, 2021; Exova BM TRADA, 2017; Karacabeyli and Gagnon, 2019). The case study was based on the data published by professional organizations involved in the design, evaluation, and optimization of processes related to the glued timber structures (WoodWorks, Bench Value). The information provided was also based on the materials and data published by designers and building contractors.

2. ABOUT GLUED TIMBER STRUCTURES

Glued laminated timber structures have been known and applied in the construction industry for a long time. Their natural benefits, such as high load-bearing capacity at low deadweight or good fire resistance, led to the fact that they were readily chosen as a construction material for sports halls and plant buildings, warehouses, swimming pools, as well as for single-family housing development. The research done in the early 1990s in Austria and Germany led to the technological novelty — the creation of lightweight panels from cross-laminated timber, which is a cost-competitive, *wood-based solution that complements the existing light frame and heavy timber options* (Karacabeyli and Gagnon, 2019, p. 18).

Glued timber has distinct features that depend on the array of grains and the cross-section of glued elements. We can distinguish the following basic types:

- Solid structural timber (German Konstruktionsvollholz) is formed by connecting lumber with wedge joints; as a result, construction elements of any length are created with a cross-section identical to the cross-section of the lumber.
- Glue laminated timber (glulam) is formed by connecting layers of lumber with a parallel array of wood grains. The material is mostly used for frames, arches, and other types of construction beams.
- Cross-laminated timber (German Kreuzlagenholz) — engineering plastic formed by gluing at least three layers of lumber, placed at a 90° angle to each other. As a result, the panels are characterized by lightness, very good thermal and acoustic isolation, and relatively high fire endurance of up to 120 minutes. Material sourced for the production of panels has to have appropriate moisture, quality, and appearance. Two types of materials are used most often: C24 or C30 class timber as longitudinal layers, and timber of lower classes, most often C16, as transversal layers of plates. The elements formed this way can be up to 18 m long and up to 5 m wide. Due to the alternating layer pattern, the elements made of this material have high strength, e.g., for tensile strength, while still possessing adequate elasticity features.

The unprecedented development of timber structure buildings was possible due to the fusion of glulam and cross-laminated timber. The developing branch of the industry involving the production and processing of the glued timber resulted in this technology and became a fully-fledged option for buildings built using structures and technologies currently

considered traditional. At the same time, sustainable management of forest resources does not harm the environment. The search for substitutes of materials such as concrete and steel that would have lower CO₂ emissions and could be reused is a desirable direction in the development of modern construction. There is currently only a small number of buildings around the world either fully or partially built using glued timber, with concrete and steel elements used as a supplement. Timber used as a material shows very good acoustic and thermal insulation parameters; it is a durable material with low deadweight which displays stable behaviour during a fire, almost until it is completely charred. Case studies show that glued timber technologies lead to a reduction of CO₂ emission into the atmosphere. Prefabrication shortens the time limit and reduces the number of employees needed for the construction process. The question whether external factors have an impact on the structure and its durability, as well as if adhesives and preservatives have an impact on the health of users, remains open, and thus a new field for study.

3. EXAMPLES OF OFFICE BUILDINGS CONSTRUCTED IN GLUED TIMBER TECHNOLOGY

The 25 King building erected in 2018 in Brisbane, Australia, by Bates Smart design studio is an example of an office building built using glued timber technology. The idea behind the creation of the building was to highlight the pure, wooden structure and to promote a warm, more natural workspace. This ten-storey open space office building was built with cross-laminated timber panels and LVL panels¹ supported on glued laminated timber poles and beams. The limited length of CLT panels applied results from the prefabrication process, transportation requirements, and the open space office area that made the architects use a 6 × 8 m modular timber grid. The wooden part of the building is supported by a reinforced-concrete ground floor foundation and V-shaped glued laminated timber columns (ill. 1). Retail and service units are located on the ground floor of the building, under its 54-m-long wooden arcade. These facilities were supposed to complete the building workspace. The wooden open structure is supposed to positively affect the aesthetic value of the interior and create a more homely atmosphere. Plywood was used not only as a supporting structural

material, but elevator shafts and emergency exits were also fully built with it. There was a reasoning behind such a choice of construction material made by the architects — because of the tunnel under the plot, the building had to be lightweight while maintaining adequate structural strength. The choice of timber for the main construction material allowed for a 74% CO₂ emission reduction and a 46% energy cost reduction. Furthermore, as a result of the prefabrication, the number of employees engaged in the construction process decreased from 60 to 12 and the construction lasted only 15 months, which is a 20% better result than in the case of an analogous steel and cement building. The additional benefit of the prefabrication of the building was that the construction site was clean and safe. It also caused less nuisance. The building received many prizes and certificates, i.a., a platinum level WELL² certificate thanks to the solutions applied.

The Austrian HoHo Tower is a building that uses glued timber and cement technology in a hybrid way (ill. 4). This energy-saving sustainable building is one of the tallest ones completed so far. Its wooden 84-m-high tower consists of 24 storeys. Timber elements make up approximately 76% of its structure. About 3600 m³ of timber had been used to create prefabricated glued timber used to build it. To increase fire safety and load-bearing capacity of the building, emergency routes, elevator shafts, and the two lowest storeys were built in reinforced concrete technology. Due to the high level of prefabrication of construction materials and external cladding, the time needed for the completion of the building was limited and the construction became safer and caused less nuisance. Approximately 300,000 MWh of energy needed for the construction of the building was saved thanks to the use of CLT panels and glulam. It also prevented the emission of the equivalent of 2800 t of CO₂ to the atmosphere, compared to a building completed entirely in reinforced concrete technology. The main issue of the project was harvesting wood from forests managed sustainably, with respect for the environment. According to the designers, rational timber resource management allowed for the construction of such a structure with no negative impact on the environment (Wolfslehner and Ludvig, n.d.).

The first glued timber office building construction made by MG Architecture studio established by Canadian architect Michael Green was the T3

¹ Laminated Veneer Lumber panels made by gluing together thin layers of veneer placed at a 90° angle to each other — structure that resembles large plywood.

² WELL is a leading tool designed for buildings. It aims to provide deliberate and healthy space that improves the well-being of its users.

building built in 2017 in Minneapolis, Minnesota. This seven-storey building with 20,000 m² of floor area was built only with renewable materials. The idea behind it was the reinterpretation of wood as a construction material. With reference to the historic building, Butler Square, which was built in 1906 in a light timber frame technology, Michael Green created a new interpretation of a wooden office building. The building structure is made with CLT panels, the bearing elements are glulam and partially NLT (Nail Laminated Timber³) panels. The building has a concrete base with six glued timber storeys erected on it. Low structural weight made it possible to limit the amount of concrete needed for a stable and resistant foundation. The open-plan implemented by designers granted a lot of freedom in forming and arranging office space. The construction of the main shaft of the structure took only nine weeks due to the application of prefabricated elements and the preparation of extended technical documentation.

The next project completed by architect Michael Green in 2020 aimed at creating a building that would have zero CO₂ emission levels during occupancy. The Catalyst Building, which was completed in Spokane, Washington, met this requirement and, as a result, received Net Zero and Zero Carbon certificates awarded by International Living Future Institute.⁴ The Catalyst Building is a five-storey building with nearly 15,000 m² of office space, located in the part of the city that is now undergoing revitalization. The specific location of the project next to an active railroad forced the architect to create a building that would withstand hostile surroundings thanks to the timber construction elements. Similar to the previous project, building designers intended to create a building that would be a symbol of green change and a different approach to designing and constructing commercial buildings in North America. The time of building construction was significantly shortened thanks to the application of prefabricated CLT panels and glulam construction elements. The limitation of operations other than the assembly of elements positively impacted the safety of the construction site, while reducing the number of nuisances caused. The developer described this project as *a cornerstone of a fully integrated neighbourhood that will serve as a lab for new sustainable technologies, materials, construction techniques,*

and operating practices (WoodWorks, 2020). The developer intended on creating a zero-CO₂ emission building. Therefore, the University of Washington was asked to help in estimating an in-built and building-generated carbon footprint while it is assumed that an analogous traditional cement and steel building generates approximately 396 kg CO₂e/m² (Simonen et al., 2017). After receiving the data analysis it became known that a building constructed with glulam or CLT generates 207 kg CO₂e/m², while simultaneously storing 204 kg CO₂e/m² in timber. Therefore, the analysis showed a slight emission surplus.

Basic information on the topic of modern glued timber technology buildings and their impact on the environment is shown in Table 1. As analysed, the environmental benefits and the reduction of the building construction period were noticeable in buildings with timber structural elements.

4. GLULAM IN ARCHITECTURE AND ITS AESTHETIC-SENSIBILITY ASPECTS

Glulam technology office buildings are a novelty in the world of architecture. They are constructed mainly in the minimalist architectural stream, highlighting the respect for nature and diverse architecture in terms of aesthetics and sensibility. Glulam buildings have diverse forms, dimensions, colours, as well as materials used for facade design that do not always underline specific building construction materials. Buildings with simple massings such as the Catalyst Building or the T3 (ill. 5) use facade panels to cover a natural wooden interior, while the 25 King building uses its transparent facade and dynamic V-shaped columns to highlight its uniqueness. Similarly, the Vienna HoHo Tower uses facade panels made from the same materials as the interior to manifest the green change it represents. The common feature of all these buildings is the way they expose glued timber structures inside the buildings. Architects gave a lot of attention to the exposure of timber elements of ceilings, walls, or, as in the case of the 25 King buildings, posts, columns, and bracings on the facades of the buildings in all projects. The open-plan design resulted in large open spaces that allowed for freedom in an office space design (ill. 3). The warmth of natural timber is augmented by a large amount of daylight entering a building through a glass facade (ill. 2). The natural raw elements used in buildings indicate a certain shift towards nature in project trends (ill. 6). Designers have highlighted many times the positive impact of natural timber on the visual experience of users, as proven by the WELL certificate

³ A type of reinforced glued timber panel that uses nails as an additional fastener.

⁴ International Living Future Institute is a non-profit organization that aims to create an eco-minded society and strives to create an urban environment free of fossil fuels. Run by Living Building Challenge Institute, it is the most rigorous eco construction standard worldwide.

No.	Project name, place of origin	Date of creation	Designer office/ designer	Environmental benefits of the applied technology	Certificates
1	25 King, Brisbane	2018	Bates Smart	<ul style="list-style-type: none"> – reduction of CO₂ emissions to the atmosphere by 74%; – reduction of energy costs by 46%; – reducing the number of employees necessary to carry out work from 60 to 12; – shortening the construction time by 20% 	<ul style="list-style-type: none"> – Platinum WELL Certification; – Targeting 6 Star Green Star Design, As Built v1.1; – NABERS Energy 5 Star ratings
2	HoHo Tower, Vienna	2018	Hasslacher Gruppe	<ul style="list-style-type: none"> – emission reduction of 2800 t CO₂ to the atmosphere; – electricity saved in quantity 300,000 MWh 	<ul style="list-style-type: none"> – Gold LEED Certification; – Austrian Sustainable Building Council — 924/1000 points
3	T3, Minneapolis	2016	MG-Architecture	<ul style="list-style-type: none"> – reducing the weight of the building, allowing the use of a smaller foundation 	<ul style="list-style-type: none"> – Gold LEED Certification
4	Catalyst, Spokane	2020	Katerra + MG-Architecture	<ul style="list-style-type: none"> – reduction of CO₂ emissions to the atmosphere by 52%, 	<ul style="list-style-type: none"> – Net Zero Certification; – Zero Carbon Certification

Tab. 1. List of office buildings constructed in glued laminated timber technology. By the author.

awarded to the 25 King office building. Systems and green technologies used in buildings designed in accordance with sustainable design guidelines ensure the reduction of CO₂ emissions.

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

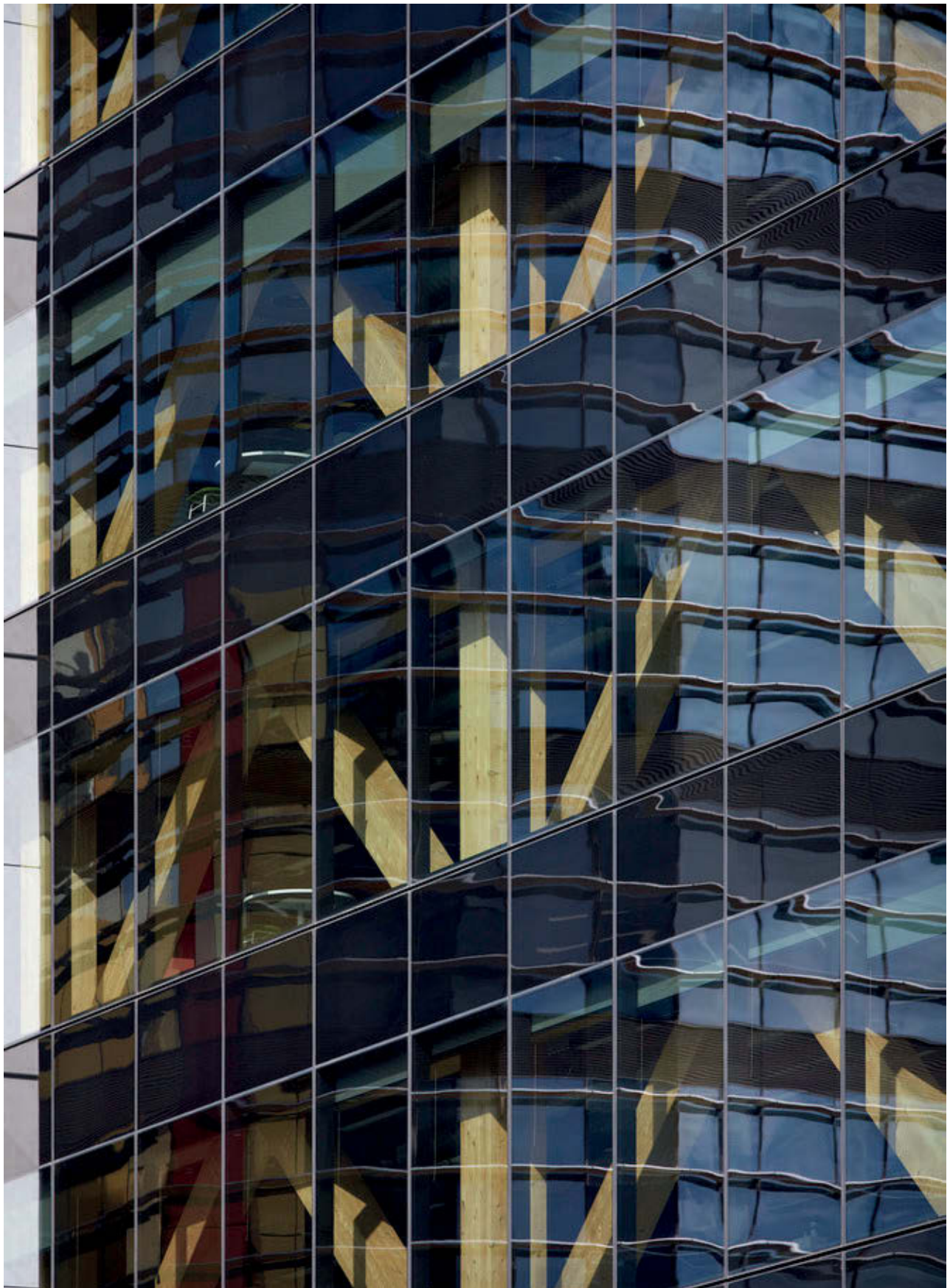
Glulam technology buildings are a novelty in the world of architecture. A clean and safe construction site that requires the involvement of a smaller number of workers also has a positive impact on the environment as it causes less nuisance and noise during construction. The ongoing changes in climate policy around the world and the increasing awareness of investors have made the search for alternatives to cement and steel become the desirable direction for the development of modern construction. The

construction material developed at the beginning of the 1990s, cross-laminated timber, made it possible to reduce CO₂ emissions into the atmosphere while maintaining good performance parameters. Research conducted during the construction of the buildings shows that it is possible to significantly reduce CO₂ emissions into the atmosphere (74% for the 25 King building, 52% for the Catalyst building), while simultaneously reducing the construction time by up to 20% thanks to the application of prefabricated elements. An unusual structure has become a pretext to manifest changes that are happening in the way of thinking about sustainable and ecological design. Designers of office buildings eagerly implement it due to the beneficial impact of natural timber on users. The first experimental buildings built using this technology map out the routes for future constructions.



III. 1. V-shaped columns of glued laminated timber on the ground floor constitute the support for the main structure. 25 King building. Photo by T. Roe.

II. 1. V-kształtne kolumny z drewna klejonego w przestrzeni parteru stanowią podporę dla głównej konstrukcji. Budynek 25 King. Fot. T. Roe.



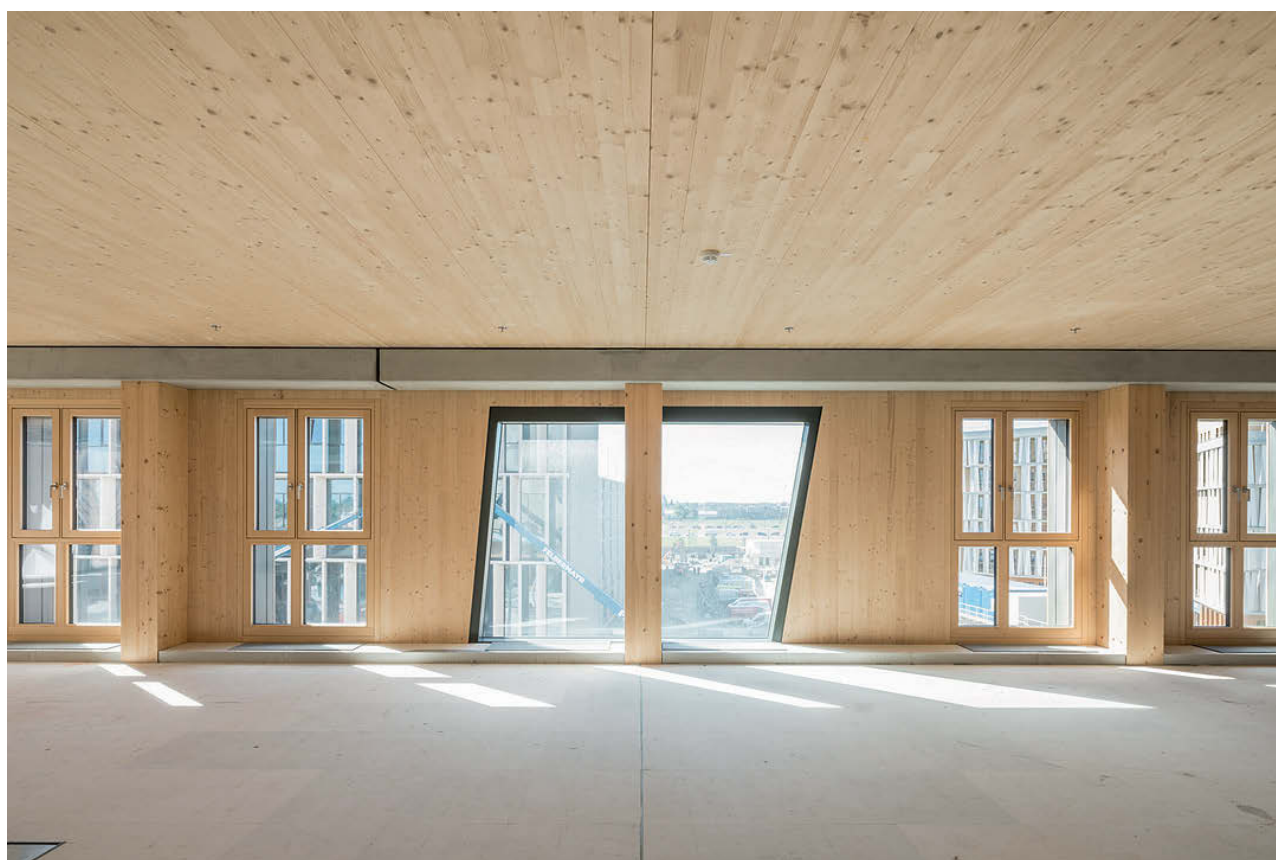
III. 2. 25 King building, project by Bates Smart, the glazed facade exposes wooden structure. Photo by T. Roe.

II. 2. Budynek 25 King projektu biura Bates Smart, przeszklona elewacja eksponuje drewnianą konstrukcję. Fot. T. Roe



Ill. 3. Open office space in the 25 King building. Photo by T. Roe.

Il. 3. Otwarta przestrzeń biurowa budynku 25 King. Fot. T. Roe.



Ill. 4. Interior of the HoHo Tower, the illustration shows prefabricated wooden and concrete elements. Photo by Hasslacher Group.

Il. 4. Wnętrze budynku HoHo Tower, na ilustracji widoczne elementy prefabrykowane drewniane oraz betonowe. Fot. Hasslacher Group.



Ill. 5. In the case of the T3 building by Michael Green, the facade does not reflect the main construction material, the wood is not exposed here. Photo by E. Peter.

Il. 5. W przypadku budynku T3 autorstwa Michaela Greena elewacja nie odzwierciedla głównego materiału konstrukcyjnego, drewno nie jest tu eksponowane. Fot. E. Peter.



Ill. 6. Thanks to the use of construction elements made of natural wood, the entrance area of the building is bright and gives a positive feeling. Catalyst building. Photo by B. Benschneider.

Il. 6. Dzięki zastosowaniu elementów konstrukcyjnych z naturalnego drewna przestrzeń wejściowa budynku jest jasna i sprawia pozytywne wrażenie. Budynek Catalyst. Fot. B. Benschneider.

1. WPROWADZENIE

Uchwalone w Parlamencie Europejskim w lipcu 2021 roku Europejskie prawo o klimacie (European Climate Law, 2021; prawo to weszło w życie 29 lipca 2021 roku) postawiło przed członkami Wspólnoty bardzo ambitny cel — ograniczenie emisji gazów cieplarnianych o 55% do roku 2030 oraz osiągnięcie neutralności klimatycznej przez wszystkich członków do roku 2050. Realizacja tak sformułowanego założenia wymaga radykalnych zmian. Jednym z głównych emitentów CO₂ do atmosfery jest branża budowlana. Szacuje się, że sektor budowlany jest odpowiedzialny za około 28% globalnej emisji CO₂ do atmosfery, a branża związana z produkcją materiałów budowlanych, takich jak stal, cement czy aluminium, za dodatkowe 11% (International Energy Agency i United Nations Environmental Programme, 2018, s. 31). Wykorzystywanie materiałów alternatywnych, przy których produkcji emisja CO₂ jest niższa i które nadają się do ponownego użycia, jest pożądanym kierunkiem rozwoju nowoczesnego budownictwa. Przykładem takich rozwiązań mogą być nowoczesne technologie drewna klejonego, które pozwalają tworzyć budynki o niższym śladzie węglowym, nastawione na rozwiązania ekologiczne oraz komfort użytkowników.

Cel pracy

Celem pracy jest poszerzenie wiedzy na temat zastosowania nowoczesnych konstrukcji z drewna klejonego w architekturze poprzez odwołanie do przykładów zrealizowanych budynków biur. Głównym zadaniem jest analiza stanu istniejącego, a zdobyta wiedza w tym zakresie umożliwi wyciągnięcie wniosków i porównanie wybranych obiektów z budynkami realizowanymi w konstrukcji tradycyjnej pod kątem aspektów środowiskowych, estetyczno-wrażeńiowych, czasu realizacji i komfortu użytkownika.

Metody

W opracowaniu zastosowano metody logicznej argumentacji, analizy porównawczej oraz studium przypadku. Analizy oparto przede wszystkim na studiach dostępnej literatury naukowej i branżowej oraz materiałów udostępnionych przez biura projektowe odpowiedzialne za realizację poszczególnych obiektów.

Zakres

Technologia drewna klejonego w architekturze budynków biurowych jest zagadnieniem stosunkowo nowym. Zakres problemowy obejmuje głównie

zagadnienia konstrukcyjne dotyczące budynków zrealizowanych z użyciem nowoczesnych technologii drewna klejonego lub w technologii hybrydowej, których wiodącą funkcją jest funkcja biurowa. Tego typu obiekty poddano analizie, a także pokrótce zarysowano przyjęte rozwiązania architektoniczne. Zgłębienie tego tematu pozwoliło na wyciągnięcie wniosków m.in. odnośnie do wpływu tych budynków na środowisko, komfortu użytkowników, przyjętych rozwiązań przestrzennych oraz sposobu kształtowania obiektów.

Przegląd literatury

Tematyka poruszona w pracy dotyczy głównie obiektów biurowych wykonanych z użyciem nowoczesnych technologii drewna klejonego. Zagadnienia związane z technologią są omawiane głównie w ujęciu ogólnym (Borysiuk, Kozakiewicz i Krzosek, 2019; Średniawa, 2021; Karacabeyli i Gagnon, 2019), natomiast nieliczne opracowania przedstawiają pierwsze realizacje, zastosowane technologie oraz ich wpływ na kształtowanie obiektów (Green i Taggart, 2020; Crawley, 2021; Exova BM TRADA, 2017; Karacabeyli i Gagnon, 2019). Studium przypadku zostało sporządzone na podstawie danych opublikowanych przez profesjonalne organizacje zajmujące się projektowaniem, oceną i optymalizacją procesów związanych z konstrukcjami z drewna klejonego (WoodWorks, Bench Value). Podane informacje oparto także na materiałach i danych publikowanych przez projektantów i wykonawców obiektów.

2. O DREWNIANYCH KONSTRUKCJACH KLEJONYCH

Konstrukcje z drewna klejonego warstwowo są znane i wykorzystywane w budownictwie od dłuższego czasu. Ich naturalne zalety, jak duża nośność przy niewielkim ciężarze własnym czy dobra odporność ogniowa, sprawiły, że były one chętnie wybranym materiałem konstrukcyjnym hal sportowych, produkcyjnych, magazynowych, basenów, a także budownictwa jednorodzinnego. Nowością technologiczną, powstałą w wyniku badań prowadzonych we wczesnych latach 90. w Austrii i Niemczech, było stworzenie lekkich paneli z drewna klejonego krzyżowo (ang. *cross-laminated timber*, CLT) jako konkurencyjnego cenowo *drewnopochodnego rozwiązania, które uzupełniło istniejące opcje lekkiego szkieletu drewnianego i drewna litego*¹ (Karacabeyli i Gagnon, 2019, s. 18).

¹ Wszystkie tłumaczenia cytatów pochodzą od autora artykułu.

Drewno klejone charakteryzuje się odmiennymi właściwościami w zależności od układu włókien i przekrojów sklejaných elementów. Wyróżnia się podstawowe typy:

- Drewno klejone po długości elementu (niem. *Konstruktionsvollholz*) — materiał powstały w wyniku łączenia tarcicy drewnianej na złącza klinowe, w wyniku czego powstać mogą elementy konstrukcyjne o dowolnej długości, o przekroju tożsamym z przekrojami łączonej tarcicy.
- Drewno klejone warstwowo (ang. *glued laminated timber*, w skrócie *glulam*) — materiał powstały w wyniku sklejanía warstw tarcicy o równoległym układzie włókien. Materiał ten jest najczęściej wykorzystywany do tworzenia ram, łuków i innych tego typu dźwigarów konstrukcyjnych.
- Drewno klejone krzyżowo (ang. *cross-laminated timber*, niem. *Kreuzlagenholz*) — tworzywo inżynierskie powstałe w wyniku sklejanía przynajmniej trzech warstw tarcicy, ułożonych względem siebie pod kątem 90°. Wynikiem tej operacji są panele charakteryzujące się lekkością, bardzo dobrą izolacyjnością termiczną i akustyczną oraz stosunkowo wysoką odpornością ogniową, osiągającą nawet 120 minut. Materiał pozyskiwany do produkcji paneli musi mieć odpowiednie wilgotność, jakość oraz wygląd. Najczęściej wykorzystuje się dwa typy materiału: drewno klasy C24 lub C30 jako warstwy podłużne oraz drewno niższych klas, najczęściej C16, jako warstwy poprzeczne płyt. Elementy powstałe w ten sposób mogą osiągać długość do 18 m przy szerokości dochodzącej do 5 m. Naprzemienny układ warstw materiału sprawia, że elementy z niego wykonane, posiadając dużą nośność, np. na zginanie, charakteryzują się jednocześnie odpowiednimi cechami sprężystości.

Połączenie drewna klejonego warstwowo oraz drewna klejonego krzyżowo sprawiło, iż możliwa stała się realizacja budynków o konstrukcji drewnianej o niespotykanej do tej pory skali. Rozwój gałęzi przemysłu związanego z produkcją oraz obróbką drewna klejonego sprawił, że technologia ta staje się realną alternatywą dla budynków wzniesionych za pomocą systemów i technologii konstrukcyjnych aktualnie uważanych za tradycyjne, a zrównoważone gospodarowanie zasobami leśnymi nie wpływa negatywnie na środowisko naturalne. Poszukiwanie substytutów takich materiałów jak beton i stal, przy których produkcji emisja CO₂ byłaby niższa i które nadawałyby się do ponownego użycia, wydaje się pożądanym kierunkiem rozwoju nowoczesnego budownictwa. Obecnie na świecie ukończone zostały nieliczne realizacje budynków wykorzystujących

technologie drewna klejonego bądź w całości, bądź hybrydowo, czyli z zastosowaniem elementów betonowych oraz stalowych w charakterze uzupełnienia. Drewno jako materiał wykazuje się bardzo dobrymi parametrami izolacyjności akustycznej oraz termicznej, jest materiałem trwałym o niewielkim ciężarze własnym, który podczas pożaru zachowuje się w sposób stabilny, niemal do czasu całkowitego zwęglenia. Studia przypadku wskazują, że technologie drewna klejonego umożliwiają ograniczenie emisji CO₂ do atmosfery, a prefabrykacja skraca czas oraz zmniejsza liczbę pracowników potrzebnych do realizacji obiektu. Kwestią otwartą, a więc nowym polem badawczym, pozostaje wpływ czynników zewnętrznych na konstrukcję oraz jej trwałość, a także wpływ środków klejących i konserwujących na zdrowie użytkowników.

3. PRZYKŁADY REALIZACJI ARCHITEKTURY BUDYNKÓW BIUR W TECHNOLOGII DREWNA KLEJONEGO

Przykładem realizacji budynku biurowego wykonanego w technologii drewna klejonego jest 25 King zrealizowany w 2018 roku w Brisbane w Australii przez biuro projektowe Bates Smart. Ideą przyswecającą jego powstaniu było wyeksponowanie czystej drewnianej konstrukcji oraz promowanie ciepłej, bardziej naturalnej przestrzeni do pracy. Ten dziesięciokondygnacyjny biurowiec o otwartym planie wykonany został z paneli drewna klejonego krzyżowo oraz paneli LVL² wspartych na słupach i belkach z drewna klejonego warstwowo. Ograniczona długość paneli CLT, wynikająca z prefabrykacji i wymogów transportowych oraz zastosowania otwartego planu przestrzeni biurowych, wymusiła na architektach wykorzystanie siatki modularnej o wymiarach 6 × 8 m. Drewniana część budynków wspiera się na żelbetowej podstawie parteru oraz V-kształtnych kolumnach z drewna klejonego warstwowo (il. 1). Na parterze obiektu, pod długą na 54 m drewnianą „arkadą”, umieszczono lokale handlowe oraz usługowe. Udogodnienia te mają uzupełnić przestrzeń pracy znajdującą się w budynku. Drewniana, odkryta struktura ma z kolei wpływać korzystnie na walory estetyczne wnętrza oraz stwarzać bardziej domową atmosferę. Klejonkę drewnianą nie tylko użyto w charakterze materiału konstrukcji nośnej, ale również wykonano

² Panele z forniru klejonego warstwowo powstają w wyniku sklejanía ze sobą pod kątem 90° cienkich warstw forniru — struktura ta przypomina wielkoprzestrzenną sklejkę.

z niej w całości piony wind i klatek ewakuacyjnych. Nie bez powodu architekci wybrali do konstrukcji taki, a nie inny materiał — z uwagi na przebiegający pod działką tunel budynek musiał cechować się niewielkim ciężarem przy zachowaniu odpowiedniej wytrzymałości. Wybór drewna jako głównego materiału konstrukcyjnego pozwolił zredukować emisję CO₂ do atmosfery o 74%, a koszty energii o 46%; co więcej, dzięki zastosowaniu prefabrykacji liczba pracowników zaangażowanych w proces budowy została zredukowana z 60 do 12, a czas budowy zamknął się w 15 miesiącach, co jest wynikiem o 20% lepszym niż w przypadku realizacji analogicznego budynku ze stali oraz betonu. Dodatkową zaletą prefabrykacji budynku jest czysty oraz bezpieczny plac budowy, który powoduje mniej uciążliwości dla otoczenia. Dzięki zastosowanym rozwiązaniom budynek uzyskał wiele nagród oraz certyfikatów, między innymi certyfikat WELL³ na poziomie „platynowym”.

Obiektem, który hybrydowo wykorzystuje technologię drewna klejonego oraz betonu, jest austriacka HoHo Tower (il. 4). Ten stworzony z myślą o zrównoważonym rozwoju, energooszczędny budynek jest jednym z najwyższych obiektów tego typu, które udało się dotąd zrealizować. Drewniana wieża o wysokości 84 m składa się z 24 kondygnacji, a elementy drewniane stanowią w przybliżeniu 76% konstrukcji. Do produkcji elementów prefabrykowanych z drewna klejonego wykorzystano ok. 3600 m³ drewna. Dla podniesienia bezpieczeństwa pożarowego oraz nośności budynku trzony ewakuacyjne, windowe oraz dwie najniższe kondygnacje wzniesiono w technologii betonu zbrojonego. Dzięki wysokiemu stopniowi prefabrykacji materiałów konstrukcyjnych oraz powłok zewnętrznych udało się ograniczyć czas potrzebny na realizację obiektu, a budowa stała się bardziej bezpieczna i mniej uciążliwa dla otoczenia. Wykorzystanie paneli CLT i drewna klejonego warstwowo pozwoliło zaoszczędzić przy wznoszeniu budynku nawet 300 tys. MWh energii oraz uniknąć wyemitowania do atmosfery ekwiwalentu 2,8 tys. t CO₂ w porównaniu z budynkiem wzniesionym w całości w technologii betonu zbrojonego. Kluczowym zagadnieniem w projekcie było pozyskiwanie drewna z lasów zarządzanych w sposób zrównoważony, z poszanowaniem środowiska naturalnego. Zdaniem projektantów dzięki racjonalnemu gospodarowaniu zasobami drzewnymi wzniesienie tego typu struktury nie wpłynęło

³ WELL jest najważniejszym narzędziem oceny budynków, jego celem jest zapewnienie przemyślanych i zdrowych przestrzeni, które poprawiają samopoczucie użytkowników.

negatywnie na środowisko naturalne (Wolfslehner i Ludwig, b.d.).

Pierwsza realizacja biurowca z drewna klejonego wykonana przez kanadyjską pracownię architektoniczną Michael Green Architecture to budynek T3 zbudowany w 2017 roku w Minneapolis w stanie Minnesota. Ten siedmiokondygnacyjny obiekt o powierzchni ponad 20 tys. m² został wybudowany jedynie z materiałów nadających się do ponownego wykorzystania. Ideą przyświecającą projektantom była reinterpretacja materiału konstrukcyjnego, jakim jest drewno. Nawiązując do historycznego budynku — Butler Square wzniesionego w 1906 roku w technologii lekkiego szkieletu drewnianego, pełniącego od 1974 roku funkcję biurowo-handlową — Michael Green stworzył nową interpretację drewnianego biurowca (il. 5). Konstrukcję obiektu stanowią lekkie panele CLT, elementy nośne z drewna klejonego warstwowo oraz częściowo panele NLT⁴. Budynek składa się z betonowej podstawy, na której wzniesiono sześć kondygnacji z drewna klejonego. Niewielki ciężar konstrukcji pozwolił ograniczyć ilość betonu potrzebnego do zapewnienia stabilnego i wytrzymałego fundamentu. Zastosowanie przez projektantów otwartego planu przestrzeni biurowej zapewnia dużą swobodę w kształtowaniu i aranżacji wnętrz. Dzięki wykorzystaniu prefabrykowanych elementów oraz przygotowaniu rozbudowanej dokumentacji technicznej wzniesienie głównego trzonu konstrukcji trwało zaledwie dziewięć tygodni.

Kolejny projekt Michaela Greena, zrealizowany w 2020 roku, zakładał stworzenie budynku, którego użytkowanie będzie generowało zerową emisję CO₂ do atmosfery. Catalyst Building, który powstał w Spokane w stanie Waszyngton, założenie to zrealizował, czego efektem jest przyznanie mu certyfikatów Net Zero oraz Zero Carbon, wydawanych przez International Living Future Institute⁵. Jest to pięciokondygnacyjny biurowiec o blisko 15 tys. m² powierzchni biurowej, wybudowany w rewitalizowanej części miasta. Specyficzna lokalizacja projektu, znajdującego się przy czynnej linii kolejowej, wymusiła na architekcie opracowanie koncepcji

⁴ *Nail Laminated Timber* — odmiana paneli z drewna klejonego, która jako dodatkowy łącznik wykorzystuje gwoździe.

⁵ International Living Future Institute to organizacja non-profit, której celem jest tworzenie ekologicznie nastawionego społeczeństwa oraz dążenie do stworzenia środowiska miejskiego wolnego od paliw kopalnych. Prowadzony przez instytut Living Building Challenge jest najbardziej rygorystycznym na świecie standardem budownictwa ekologicznego.

budynku, który dzięki wykorzystaniu drewnianych elementów konstrukcyjnych poradzi sobie z nieprzychylnymi warunkami otoczenia. Podobnie jak w przypadku poprzednio wymienionych realizacji twórcom przyświecała idea zaprojektowania obiektu — symbolu zielonej zmiany, odmiennego podejścia do projektowania i realizacji budynków komercyjnych w Ameryce Północnej. Wykorzystanie prefabrykowanych paneli CLT oraz elementów konstrukcyjnych z drewna klejonego warstwowo znacząco skróciły czas wznoszenia obiektu. Ograniczenie operacji innych niż montaż elementów korzystnie wpłynęło na bezpieczeństwo placu budowy przy jednoczesnym ograniczeniu uciążliwości dla otoczenia. Inwestor określił ten projekt mianem *kamienia węgielnego w pełni zintegrowanego sąsiedztwa, które posłuży jako laboratorium nowych, zrównoważonych technologii, materiałów, technik budowlanych i praktyk operacyjnych* (WoodWorks, 2020). Zależało mu na realizacji budynku o zero-

wym bilansie emisji CO₂. Zwrócono się więc do Uniwersytetu Waszyngtońskiego z prośbą o pomoc w oszacowaniu wbudowanego w Catalyst Building i wytworzonego przez niego śladu węglowego, przy założeniu, iż analogiczny obiekt w tradycyjnej technologii betonu i stali generuje w przybliżeniu 396 kg CO₂e/m² (Simonen i in., 2017) Po otrzymaniu wyników analizy okazało się, że biurowiec wykonany z użyciem materiałów konstrukcyjnych takich jak glulam czy CLT generuje emisję na poziomie 207 kg CO₂e/m², jednocześnie magazynując w drewnie 204 kg CO₂e/m². Analiza wykazała więc nieznaczoną nadwyżkę emisji.

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe informacje na temat budynków wykorzystujących nowoczesne technologie drewna klejonego oraz ich wpływ na środowisko. Jak wynika z analizy, zauważalne są korzyści środowiskowe oraz skrócenie czasu realizacji obiektów, w których zastosowano drewniane elementy konstrukcyjne.

Lp.	Nazwa projektu, miejsce powstania	Data powstania	Biuro projektowe lub projektant	Korzyści środowiskowe płynące z zastosowanej konstrukcji	Uzyskane certyfikaty
1.	25 King, Brisbane	2018	Bates Smart	<ul style="list-style-type: none"> – redukcja emisji CO₂ do atmosfery o 74%; – zmniejszenie kosztów energii o 46%; – zmniejszenie liczby pracowników niezbędnych do realizacji pracy z 60 do 12; – skrócenie czasu budowy o 20% 	<ul style="list-style-type: none"> – Platinum WELL Certification; – Targeting 6 Star Green Star Design, As Built v1.1; – NABERS Energy 5 Star
2.	HoHo Tower, Wiedeń	2018	Hasslacher Group	<ul style="list-style-type: none"> – redukcja emisji CO₂ do atmosfery o 2,8 tys. t; – oszczędność energii elektrycznej wynosząca 300 tys. MWh 	<ul style="list-style-type: none"> – Gold LEED Certification; – Austrian Sustainable Building Council — 924/1000 punktów
3.	T3, Minneapolis	2016	Michael Green Architecture	<ul style="list-style-type: none"> – zmniejszenie wagi budynku, pozwalające na zastosowanie mniejszego fundamentu 	<ul style="list-style-type: none"> – Gold LEED Certification
4.	Catalyst, Spokane	2020	Katerra + Michael Green Architecture	<ul style="list-style-type: none"> – redukcja emisji CO₂ do atmosfery o 52% 	<ul style="list-style-type: none"> – Net Zero Certification; – Zero Carbon Certification

Tab. 1. Zestawienie budynków biurowych zrealizowanych w technologii drewna klejonego. Opracowanie własne.

4. DREWNO KLEJONE W ARCHITEKTURZE I JEJ ASPEKTY ESTETYCZNO-WRAŻENIOWE

Budynki biurowe w technologii drewna klejonego są w świecie architektury nowością. Obiekty te realizowane są przede wszystkim w nurcie architektury minimalistycznej, z naciskiem na poszanowanie natury oraz zróżnicowanie estetyczne i wrażeń. Bryły budynków cechują się różnorodnością formy, gabarytów, kolorystyki, a także materiałów wykorzystanych do kształtowania elewacji, które nie zawsze podkreślają specyfikę materiału konstrukcyjnego. Budynki o prostych, prostopadłościennych formach, jak Catalyst Building czy T3 (il. 5), panelami elewacyjnymi zakrywają naturalne, drewniane wnętrza, podczas gdy budynek 25 King swoją transparentną elewacją oraz dynamicznymi, V-kształtnymi kolumnami stara się podkreślić swoją wyjątkowość. Podobnie wiedeńska HoHo Tower za sprawą paneli elewacyjnych wykonanych z tego samego materiału, co wnętrza, manifestuje zieloną zmianę, którą ma reprezentować.

Cechą wspólną wszystkich tych obiektów jest sposób eksponowania konstrukcji z drewna klejonego wewnątrz budynku. W każdym z projektów architektki przywiązywali dużą wagę do odsłonięcia drewnianych elementów stropów między kondygnacyjnych, ścian czy, jak w przypadku 25 King, słupów, kolumn i stężeń na elewacji budynku. Duże, wolne przestrzenie, które udało się uzyskać dzięki zastosowaniu otwartego planu, zapewniają swobodę w kształtowaniu przestrzeni biurowych (il. 3). Ciepło naturalnego drewna potęgowane jest dużą ilością światła dziennego dostającego się do budynków poprzez szklane elewacje (il. 2). Naturalne, surowe materiały zastosowane w budynkach sygnalizują pewien zwrot w stronę natury widoczny w tendencjach projektowych (il. 6). Projektanci wielokrotnie podkreślali pozytywny wpływ naturalnego drewna na wrażenia wizualne użytkowników, czego najlepszym przykładem może być uzyskany przez biurowiec 25 King certyfikat WELL. Budynki te, tworzone zgodnie z założeniami projektowania zrównoważonego, cechują się zastosowaniem systemów i technologii ekologicznych, które zapewniają ograniczenie emisji CO₂.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Budynki wykonane w technologii drewna klejonego są w świecie architektury nowością. Zmieniające się priorytety prowadzenia polityki klimatycznej w skali

światowej oraz coraz większa świadomość inwestorów sprawiły, że poszukiwanie materiałów alternatywnych dla betonu i stali stało się pożądanym kierunkiem rozwoju współczesnego budownictwa. Materiał konstrukcyjny opracowany na początku lat 90. XX wieku, jakim są panele z drewna klejonego krzyżowo, pozwolił ograniczyć emisję CO₂ do atmosfery przy zachowaniu dobrych parametrów użytkowych. Badania prowadzone podczas realizacji pierwszych obiektów wskazują, że możliwe jest znaczące zmniejszenie emisji CO₂ do atmosfery — osiągnięto spadek o 74% przy realizacji 25 King i o 52% w przypadku Catalyst Building, przy jednoczesnym skróceniu czasu pracy nawet o 20%, możliwemu dzięki zastosowaniu prefabrykacji elementów. Ponadto czysty oraz bezpieczny plac budowy, który wymaga zaangażowania mniejszej liczby pracowników, wpływa korzystnie na otoczenie, powodując mniej uciążliwości oraz hałasu podczas procesu budowy.

Nietypowa konstrukcja stała się pretekstem do manifestowania zmian, jakie zachodzą w sposobie myślenia o zrównoważonym i ekologicznym projektowaniu. Korzystny wpływ naturalnego drewna na odczucia użytkowników sprawił, że po materiał ten chętnie sięgnęli projektanci budynków biurowych. Pierwsze, eksperymentalne obiekty wykorzystujące tę technologię wytyczają szlaki dla przyszłych realizacji.

REFERENCES

- Alvarado, I. and Henke, W. (2018), *Colvin Case Study: T3: Timber, Transit & Technology — University of St. Thomas*, [n.p.]: Colvin Institute of Real Estate Development. Available at: <https://arch.umd.edu/sites/default/files/docs/University%20of%20St.%20Thomas.pdf> (accessed: 05.05.2022)
- Borysiuk, P., Kozakiewicz, P. and Krzosek, S. (2019), *Drewniane materiały konstrukcyjne*, Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Crawley, N. (2021), *Cross Laminated Timber: A Design Stage Primer*, London: RIBA Publishing.
- Exova BM TRADA (2017), *Cross-Laminated Timber: Design and Performance*, Buckinghamshire: Exova BM TRADA.
- European Climate Law (2021), Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999.
- Green, H.J.M. and Taggart, J. (2020), *Tall Wood Buildings: Design, Construction and Performance*, 2nd and expanded ed., Basel: Birkhäuser.
- International Energy Agency and United Nations Environmental Programme (2018), 2018 *Global Status Report: Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*, [n.p.]: United Nations Environment Programme. Available at: <https://>

www.worldgbc.org/sites/default/files/2018%20GlobalABC%20Global%20Status%20Report.pdf (accessed: 05.05.2022).

Karacabeyli, E. and Gagnon, S. (2019), *Canadian CLT Handbook*, Pointe-Claire: FPInnovations.

Simonen, K. et al. (2017), *Embodied Carbon Benchmark Study: LCA for Low Carbon Construction: Part One*, Seattle: The Carbon Leadership Forum, Department of Architecture, University of Washington. Available at: <http://hdl.handle.net/1773/38017> (accessed: 05.05.2022)

Średniawa, W. (2021), *Zastosowanie konstrukcji z drewna klejonego w budownictwie ogólnym i mostownictwie*, Kraków: Wydawnictwo PK.

Wolfslehner, B. and Ludvig, A. (n.d.), *The „HoHo” building in Vienna, Austria*, [n.p.]: Bench Value. Available at: <http://benchvalue.efi.int/uploads/documents/deliverables/D1.4%20Austria.pdf> (accessed: 05.05.2022).

WoodWorks (2020), *Catalyst: Case Study*. Available at: https://www.woodworks.org/wp-content/uploads/case_study-Catalyst.pdf (accessed: 05.05.2022).