

mgr inż. Michał Dzun^{1*)}

ORCID: 0000-0003-2476-5538

prof. dr hab. inż. Czesław Miedzialowski¹⁾

ORCID: 0000-0002-7901-7598

Construction of wooden modular buildings

Konstruowanie drewnianych budynków modułowych

DOI: 10.15199/33.2025.02.04

Abstract. At the beginning of the article, reference was made to the history of the development of wooden modular construction and previous representative research and computational and experimental analyzes were presented. Attention was paid to the main peculiarities of prefabricated wooden buildings, such as wood shrinkage, pressure deformations, the occurrence of loose connections and deformations of structural and acoustic spacers. The structure and the most important connection solutions in the modules of the frame and slab systems are shown. The article ends with a description of how to assemble buildings composed of modules.

Keywords: wooden construction; modular construction; structure; connections.

Wooden construction is one of the oldest types of man-made structures, first due to the availability of raw material, and now for ecological reasons. Wood is treated as an eco-friendly renewable and carbon-absorbing raw material and can be easily shaped in terms of construction and insulation. The use of wood products makes it possible to manufacture objects in prefabrication plants and then transport them to the construction site, even over a long distance, serving the demand of foreign markets, such as German or Scandinavian ones.

Progress in construction industry takes place through the use of ever newer material technologies and construction solutions. Recent decades have resulted in the intensive development of prefabrication systems. The reason their development was a very high demand for residential buildings at the time of reconstruction of European countries destroyed during World War II. The war losses translated into an increased interest in large-slab technology, known from France and the Scandinavian countries [1]. Prefabrication still is growing in popularity. The main arguments convincing investors to choose this technology are a substantial reduction of the effects of shortage of skilled labour and almost complete elimination of the impact of weather conditions on the course of the project. Changing the traditional technology in favour of prefabrication makes it possible to shorten the execution time by half and reduce costs by 25 – 40% in the scale of the entire project [1].

In terms of construction, three types of prefabrication can be distinguished:

1) **rib/frame system** – this group includes lightweight frame buildings made directly on site;

Streszczenie. Przedstawiono dotychczasowe reprezentatywne badania i analizy obliczeniowe, a także doświadczalne dotyczące drewnianego budownictwa modułowego. Zwrócono uwagę na główne cechy prefabrykowanego budownictwa drewnianego, jak skurcz drewna, deformacje dociskowe, występowanie luzów w połączeniach oraz deformacje przekładek konstrukcyjnych i akustycznych. Pokazano konstrukcję oraz ważniejsze rozwiązania połączeń w modułach systemu szkieletowego i płytowego. Artykuł zakończono opisem sposobu montażu budynków złożonych z modułów.

Słowa kluczowe: budownictwo drewniane; budownictwo modułowe; konstrukcja; połączenia.

Budownictwo drewniane jest jednym z najstarszych typów konstrukcji wykonywanych przez człowieka, najpierw z powodu dostępności surowca, a obecnie ze względów ekologicznych. Drewno traktuje się jako ekologiczny surowiec odnawialny i pochłaniający dwutlenek węgla oraz dający się łatwo kształtować pod względem konstrukcyjnym i izolacyjnym. Stosowanie wyrobów z drewna umożliwia wytworzenie obiektów w zakładach prefabrykacji i następnie transportowanie na plac budowy, nawet na znaczną odległość, obsługując zapotrzebowanie zagranicznych rynków, np. niemieckiego lub skandynawskiego.

Postęp w budownictwie odbywa się przez stosowanie coraz nowszych technologii materiałowych i rozwiązań konstrukcyjnych. Ostatnie dziesięciolecie zaowocowały intensywnym rozwojem systemów prefabrykacji. Powodem do zapoczątkowania ich powstawania było bardzo duże zapotrzebowanie na obiekty mieszkalne w czasach odbudowy krajów Europy zniszczonych w trakcie II wojny światowej. Poniesione straty wojenne przełożyły się na wzrost zainteresowania technologią wielkiej płyty, znanej z Francji oraz krajów skandynawskich [1]. Prefabrykacja nadal zyskuje na popularności. Głównymi argumentami przekonującymi inwestorów do wyboru tej technologii jest zdecydowane ograniczenie skutków niedoboru wykwalifikowanej kadry oraz niemal całkowite wyeliminowanie wpływu warunków atmosferycznych na przebieg realizacji inwestycji. Zmiana technologii tradycyjnej na rzecz prefabrykacji pozwala na skrócenie czasu realizacji o połowę oraz redukcję kosztów o 25 – 40% w skali całego przedsięwzięcia [1].

Pod względem konstruowania, można wyróżnić trzy typy prefabrykacji:

1) **system żebrowy/szkieletowy** – do tej grupy zaliczają się lekkie budynki szkieletowe wykonywane bezpośrednio na placu budowy;

2) **system płytowy** – w tym przypadku wykonuje się pojedyncze płaskie panele ścienne i stropowe, łączone ze sobą kolejno na placu budowy podczas montażu konstrukcji;

¹⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

^{*}) Correspondence address: michal.dzun@pb.edu.pl

2) **panel system** – in this case, individual flat wall and floor panels are made, connected to each other sequentially on the construction site during the assembly of the structure;

3) **modular system** – these are oversized modules of rectangular shape and size adapted to the dimensional capabilities of wheeled transport [2].

Prefabrication and modularity of the manufactured objects come down to standardization and repetition of the solutions used. This ensures a very good quality of products and a high pace of work. A characteristic manifestation of the standardization of skeletal structures is the adoption of a fixed axial spacing of posts of 400 or 625 mm. It corresponds to the waste-free use of layers of insulating material, and multiples of this spacing to the dimensions of sheathing panels. The dimensions of the individual structural elements are adjusted to the available transport possibilities. The sum of measures is aimed at reducing the time required for construction of the structure and minimising the costs.

Recently, a significant body of literature has been published on the construction of modular structures, but far less on their modeling and static calculations.

This article presents the history and research of modular building elements, and the next article will discuss the main directions of module construction in the frame and panel system.

History of development and research of wooden elements of modular construction

The article [3] presents the history of modular construction, which began with Malcolm McLean's idea of containerized shipping. The beginnings of modular construction are set in the 1960s with the use of sanitary cabin elements in Poland. An interesting solution was presented in the article [4], focusing on research on the development of the author's architectural concept of a single-family house from two types of modules, capable of being set in any configuration.

There are many ways to build a computational model of timber frame structures [5]. The most common one is to use of the Finite Element Method, which makes it possible to build a precise model containing a lot of details. However, it should be noted that with the precise representation of the model, the number of finite elements and unknowns increases, which significantly increases the time and labour required to solve the model. Therefore, a high-precision model taking into account the presence of every fastener between the sheathing plate and the wall frame, as described in work [5], is not a very good solution due to labour intensity and the possibility of mistakes. For this reason, paper [6] proposes a solution for FEM modeling, enabling high-precision results to be achieved with less labour intensity compared to the approach presented in paper [5]. The solution proposed in the paper [6] is based on the replacement of beam connectors (such as staples or nails), located in one plane of the element, by shell solutions with appropriately selected parameters.

3) **system modułowy** – są to przestrzenne moduły o kształcie prostopadłościennym i rozmiarach dostosowanych do możliwości gabarytowych transportu kołowego [2].

Prefabrykacja oraz modularność wytwarzanych obiektów sprawdza się do standaryzacji i powtarzalności stosowanych rozwiązań. Zapewnia to bardzo dobrą jakość wyrobów oraz duże tempo robót. Charakterystycznym przejawem standaryzacji konstrukcji szkieletowych jest przyjęcie stałego rozstawu osiowego słupków wynoszącego 400 lub 625 mm. Odpowiada on bezodpadowemu wykorzystaniu warstw materiału izolacyjnego, a wielokrotność tego rozstawu wymiarom płyt poszycia. Wymiary poszczególnych elementów konstrukcyjnych dostosowywane są do dostępnych możliwości transportowych. Suma działań ma na celu skrócenie czasu potrzebnego do wybudowania konstrukcji oraz redukcję kosztów.

W ostatnim czasie ukazało się dużo pozycji literaturowych dotyczących konstruowania obiektów modułowych, a zdecydowanie mniej dotyczących modelowania i obliczeń statycznych tych konstrukcji. W artykule przedstawiono historię i badania elementów budownictwa modułowego, a w kolejnym pokazane zostaną główne kierunki konstruowania modułów w systemie szkieletowym i płytowym.

Historia rozwoju i badania elementów drewnianych budownictwa modułowego

W artykule [3] przedstawiono historię budownictwa modułowego, która rozpoczęła się od pomysłu Malcolma McLeana dotyczącego kontenerowego transportu morskiego. Początki budownictwa modułowego określa się na lata sześćdziesiąte XX wieku od zastosowania w Polsce elementów kabin sanitarnych. Ciekawe rozwiązanie zostało przedstawione w artykule [4], skupiającym się na badaniach nad opracowaniem autorskiej koncepcji architektonicznej jednorodzinnej domu z dwóch typów modułów, zdolnych do ustawienia w dowolnych konfiguracjach.

Jest wiele możliwości budowania modelu obliczeniowego szkieletowych konstrukcji drewnianych [5]. Jedną z najczęstszych jest wykorzystanie Metody Elementów Skończonych, która umożliwia zbudowanie precyzyjnego modelu zawierającego dużo szczegółów. Należy jednak pamiętać, że wraz z precyzyjnym odwzorowaniem modelu zwiększa się liczba elementów skończonych i niewiadomych, co znacznie wydłuża czas oraz zwiększa nakłady pracy potrzebne do jego rozwiązania. W związku z tym, bardzo precyzyjny model uwzględniający występowanie każdego łącznika pomiędzy płytą poszycia a szkieletem ściany, opisany w pracy [5], nie jest zbyt dobrym rozwiązaniem ze względu na pracochłonność i możliwość wystąpienia pomyłek. Z tego powodu w pracy [6] zaproponowano rozwiązanie modelowania metodą MES, pozwalające na uzyskanie dużej precyzji wyników, przy mniejszej pracochłonności, niż miało to miejsce w przypadku rozwiązania z pracy [5]. Rozwiązanie zaproponowane w pracy [6] polega na zastąpieniu łączników belkowych (takich jak zszywki czy gwoździe), położonych w jednej płaszczyźnie elementu, rozwiązaniami powłokowymi o odpowiednio dobranych parametrach.

Dotychczas przeprowadzono na świecie niewiele badań eksperymentalnych dotyczących modułowych budynków drewn-

To date, there have been a few experimental studies on modular wooden buildings in the world. More research has been done on flat wall elements [7, 8]. The most recent work on this topic is article [8], which analyzes the process and results of a study on a three-story wooden modular building, focusing on its stiffness under horizontal forces. The main function of the horizontal diaphragms (floor/ceiling planes) is to transmit horizontal forces to the vertical load-bearing elements (stiffening walls). The secondary function is to bind the entire structural system and protect the wall panels from buckling [9]. The distribution of horizontal forces and deformations of a modular building depend primarily on the horizontal stiffness of the connections between the modules. The assumptions for classifying the stiffness of modular construction are presented in the article [10].

Numerical approaches to the analysis of wooden modular structures are carried out far more often than experimental analyses. The article [11] describes the course and effects of experimental and numerical studies, derived from two research projects on wooden modular buildings carried out in Sweden. The carried out analyses are to be used to develop and validate an efficient FEM model, in an approach to both global and local detailed analysis of structural behaviour. The paper [12] presents a FEA analysis of alternative load transfer paths in a modular building during six failure scenarios proposed by the author. Issues related to the problems of shaping high timber modular buildings are presented in the paper [13], including the innovative structural solutions used in the construction of a 14-story building located in Norway, as well as the waveform results of the modal analysis of a package of two pairs of modules and the results obtained from the developed FEM model. The combination of stacked timber modules with a glulam stiffening truss, described in the article [13], enabled a significant reduction in the structure's natural vibration (to the acceptable level). Deeper analyses of the function of the glulam stiffening frame and its optimization in terms of the shape and stiffness characteristics of the nodes are presented in the article [14]. An alternative approach to the matter is the way described in the article [15]. It presents a solution based on using a combination of wood and steel in building a modular structural system of a facility. The structure is supposed to be resistant to seismic impacts and meet the objectives of sustainable development. The article also describes FEM analyses of the selected connections of structural elements with wall and floor panels.

Intermodular connections are a very important topic for the operation of the entire structure. The Eurocodes currently in use do not fully account for newly introduced technologies in many branches of construction development. This situation manifests itself, for example, in the case of acoustic insulation spacers, which reduce the load-bearing capacity and stiffness of the structure in the joints. The author of the paper [9] presents the calculations according to the approach of [16], considering spacers from the insulation. The paper [9] also presents an FEA analysis of a modular object taking into account the stiffness of the nodes and a proposal for an alternative spatial node connecting the corners of the modules. Possibilities for the application of the latest technologies in construction have 3D-printed connectors, described in articles

nianych. Więcej badań dotyczyło płaskich elementów ściennych [7, 8]. Najnowszą pracą z tej tematyki jest artykuł [8], prezentujący przebieg i rezultaty badania drewnianego trzypiętrowego budynku modułowego ze względu na sztywność wskutek działania sił poziomych. Główną funkcją przępon poziomych (płaszczyzny stropów/sufitów) jest przeniesienie sił poziomych na pionowe elementy nośne (ściany usztywniające). Drugorzędną funkcją jest powiązanie całego układu konstrukcyjnego i zabezpieczenie przed wyboczeniem paneli ściennych [9]. Rozkład sił poziomych i odkształcenia budynku modułowego zależą przede wszystkim od sztywności poziomej połączeń między modułami. Założenia dotyczące klasyfikacji sztywności konstrukcji modułowej przedstawiono w artykule [10].

Numeryczne podejście do analizy drewnianych konstrukcji modułowych jest przeprowadzane zdecydowanie częściej niż analizy eksperymentalne. Artykuł [11] przedstawia przebieg i efekty badań doświadczalnych oraz numerycznych, pochodzących z dwóch projektów badawczych realizowanych w Szwecji, dotyczących drewnianych budynków modułowych. Przeprowadzone analizy mają posłużyć do opracowania i walidacji wydajnego modelu MES, w podejściu zarówno do globalnej, jak i lokalnej, szczegółowej analizy zachowania konstrukcji. W pracy [12] przedstawiono analizę MES alternatywnych ścieżek przekazywania obciążeń w budynku modułowym podczas sześciu scenariuszy awarii zaproponowanych przez autora. Zagadnienia związane z problematyką kształtowania wysokich budynków modułowych z drewna zostały przedstawione w pracy [13], w tym nowatorskie rozwiązania konstrukcyjne wykorzystane przy konstruowaniu 14-piętrowego budynku położonego w Norwegii oraz przebieg i rezultaty analizy modalnej pakietu dwóch par modułów i wyniki uzyskane z opracowanego modelu MES. Połączenie ustawionych na sobie modułów drewnianych z kratownicą usztywniającą z drewna klejonego, opisanych w artykule [13], pozwoliło na znaczną redukcję drgań własnych konstrukcji (do poziomu akceptowalnego). Głębsze analizy funkcji ramy usztywniającej wykonanej z drewna klejonego oraz jej optymalizacji pod względem kształtu i charakterystyki sztywnościowej węzłów przedstawiono w artykule [14]. Alternatywnym podejściem do sprawy jest sposób opisany w artykule [15]. Przedstawia on rozwiązanie polegające na wykorzystaniu połączenia drewna ze stalą w budowaniu modułowego systemu konstrukcyjnego obiektu. Konstrukcja ta ma być odporna na oddziaływania sejsmiczne i spełniać założenia zrównoważonego rozwoju. W artykule tym opisano również analizy MES wybranych połączeń elementów konstrukcyjnych z panelami ściennymi i stropowymi.

Połączenia międzymodułowe są tematem bardzo istotnym ze względu na pracę całej konstrukcji. Obecnie stosowane Eurokody nie ujmują w pełni w wielu gałęziach rozwoju budownictwa nowo wprowadzanych technologii. Sytuacja ta przejawia się np. w przypadku przekładek izolacji akustycznej, które zmniejszają nośność i sztywność konstrukcji w połączeniach. Autor w pracy [9] prezentuje obliczenia wg podejścia [16] z uwzględnieniem przekładek z izolacji. Praca [9] przedstawia również analizę MES obiektu modułowego z uwzględnieniem sztywności węzłów i propozycję alternatywnego przestrzennego węzła łączącego naroża modułów. Możliwości zastosowania najnowszych tech-

[17, 18]. Taking advantage of the freedom of building design and the use of complex computational models allows enables construction of connectors with complex geometries and transferring large forces between modules.

Modular building structures

Modular building structures and their combinations, shown schematically in Figure 1, differ from the traditional frame building solutions. In the traditional approach, the entire building is divided into individual walls and ceilings that form the panels, allowing a wide variety of architectural forms. In the case of modular construction, it is necessary to properly plan the shape of the entire building to allow the most efficient division into individual cuboid modules. In the construction of such elements, there are traditional solutions and new ones, resulting from the unique characteristics of the new form of modular construction. In the case of concentrated forces, the pressures cause local deformations, an example of which (in the form of the pressure of the frame structure post against the lower rafter of the wall) is shown in Figure 2a,

nologii w budownictwie mają drukowane, trójwymiarowe łączniki, opisane w artykułach [17, 18]. Wykorzystanie swobody kształtowania budynków i stosowania złożonych modeli obliczeniowych pozwala na konstruowanie łączników o złożonej geometrii i przenoszących duże siły pomiędzy modułami.

Konstrukcje budynków modułowych

Konstrukcje budynków z modułów oraz ich połączenia, przedstawione schematycznie na rysunku 1, różnią się od tradycyjnych rozwiązań budownictwa szkieletowego. W podejściu tradycyjnym, cały budynek dzielony jest na pojedyncze ściany i stropy stanowiące panele, dzięki czemu możliwe jest swobodne kształtowanie różnorodnych form architektonicznych. W przypadku konstrukcji modułowych, niezbędne jest odpowiednie rozplanowanie kształtu całego obiektu, aby umożliwić najwydajniejszy podział na pojedyncze moduły prostopadłościenne. W konstruowaniu tego typu elementów występują rozwiązania tradycyjne oraz nowe, wynikające ze specyfiki nowej formy budownictwa modułowego. W przypadku sił skupionych, dociski powodują lokalne deformacje, których przykład (w postaci docisku słupka konstrukcji szkieletowej do dolnego ryglu ściany)

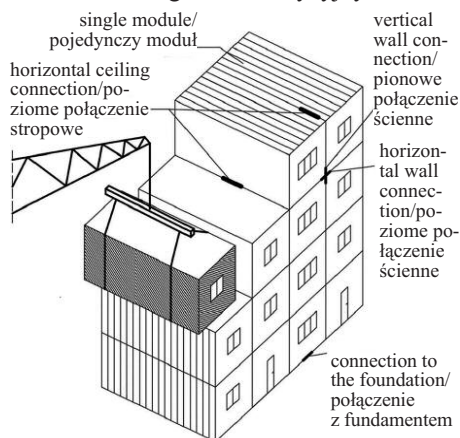


Fig. 1. Scheme of building construction from modules and their connections

Rys. 1. Schemat konstrukcji budynków z modułów oraz ich połączenia

and the locations of clearances between elements are shown in Figure 2b. The work of individual elements is also affected by acoustic spacers made of polyurethane compound or structural plywood spacers, schematically shown in Figure 2c. The deformation of the joints and elements can also be the result of shrinkage and swelling of the lumber. The different directions describing these effects are shown in Figure 2d.

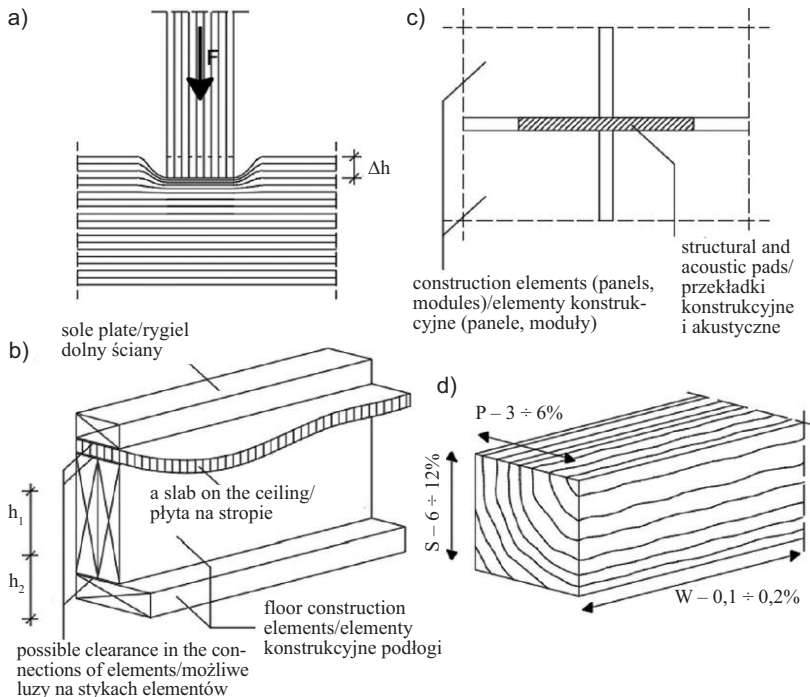


Fig. 2. Schematic representation of: a) deformation of the pressure across the fibres along the length of the element; b) possible places of looseness in the connections of ceiling elements; c) detail of the contact pressure in the corners of panels/modules; d) values and directions of shrinkage of the elements [19]

Rys. 2. Schematyczne przedstawienie: a) deformacji docisku w poprzek włókien na długości elementu; b) możliwe miejsca występowania luzów w połączeniach elementów stropów; c) detal docisku styku w narożnikach paneli/modułów; d) wartości i kierunki skurczu elementów [19]

The change in dimension of a component under shrinkage/swelling can be determined from the following relationship [5]:

został przedstawiony na rysunku 2a, a miejsca występowania luzów pomiędzy elementami na rysunku 2b. Na pracę poszczególnych elementów mają również wpływ przekładki akustyczne wykonane z masy poliuretanowej lub konstrukcyjne przekładki ze sklejki, schematycznie pokazane na rysunku 2c. Deformacja złączy i elementów może być również efektem skurczu i pęcznienia tarcicy. Poszczególne kierunki opisujące te efekty pokazano na rysunku 2d.

Zmianę wymiaru elementu pod wpływem skurczu/pęcznienia można wyznaczyć z następującej zależności [5]:

$$\Delta l = l \cdot \alpha_w \cdot \Delta w \quad (1)$$

where:

l – the dimension of the element at a given moisture content;
 Δw – the percentage change in moisture content;
 α_w – the shrinkage/swelling coefficient expressed in values per one percent change in moisture content. This coefficient is a characteristic quantity determined individually for each species of wood and direction relative to the grain pattern.

Deformations in the structure due to compression of the wood and interlayers can be described as follows:

$$\Delta h_d = \left(\sum \frac{\sigma_{c,90,k}}{E_{0,mean}} \cdot h_b + \sum \frac{\sigma_c}{E_{wp}} \cdot h_{wp} \right) (1 + \psi_{21} \cdot k_{def}) \quad (2)$$

where:

$\sum \frac{\sigma_{c,90,k}}{E_{0,mean}}$ – deformation from compression by beam joints;
 h_b – thickness of compression beams;
 $\sum \frac{\sigma_c}{E_{wp}}$ – deformation from compression of the interlayers;
 h_{wp} – thickness of interlayers;
 ψ_{21} – load combination factor;
 k_{def} – coefficient that takes into account the increase in displacement over time and due to the combined effect of creep and moisture change.

Force- and moment-loaded joints are characterized by linear deformations and node rotation (Figure 3). The basis for the construction of bar connections are simple connections for nails, screws or angles. Another type of connections are those for perforated plates (sheets).

The stiffness in each direction can be determined from the following relationships:

$$\varphi_z = \frac{M_z}{K_z} \quad (3)$$

$$K_z = \frac{1}{\frac{1}{K_{zg}} + \frac{1}{K_{zd}}} \quad (4)$$

where:

φ_z – rotational stiffness of the joint;
 K_{zg} – flexural stiffness of the upper bar;
 K_{zd} – flexural stiffness of the lower bar.

Typically, 3 – 6-story residential buildings are constructed from modules. A common solution used in high-rise buildings is the introduction of an additional frame structure made of glulam or steel, on which the individual modules are supported. It ensures adequate spatial stiffness of the entire structure and prevents exceeding the allowable pressures under the columns of the lowest floors. The construction of buildings must lead to the fulfilment of the Ultimate Limit States and Service Limit States by the structure as a whole, as well as by individual structural elements, including

$$\Delta l = l \cdot \alpha_w \cdot \Delta w \quad (1)$$

gdzie:

l – wymiar elementu przy danej wilgotności;
 Δw – procentowa wartość zmiany wilgotności;
 α_w – współczynnik skurczu/pęcznienia wyrażony w wartości na jeden procent zmiany wilgotności. Współczynnik ten jest wielkością charakterystyczną wyznaczaną indywidualnie dla każdego gatunku drewna oraz kierunku względem układu słoików.

Deformacje w konstrukcji spowodowane ścisaniem drewna i warstw przekładkowych można opisać następująco:

$$\Delta h_d = \left(\sum \frac{\sigma_{c,90,k}}{E_{0,mean}} \cdot h_b + \sum \frac{\sigma_c}{E_{wp}} \cdot h_{wp} \right) (1 + \psi_{21} \cdot k_{def}) \quad (2)$$

gdzie:

$\sum \frac{\sigma_{c,90,k}}{E_{0,mean}}$ – deformacja od docisku słupkami zestawu belek;
 h_b – grubość belek ścisanych;
 $\sum \frac{\sigma_c}{E_{wp}}$ – deformacja od ścisania warstw przekładkowych;
 h_{wp} – grubość warstw przekładkowych;
 ψ_{21} – współczynnik kombinacji obciążeń;
 k_{def} – współczynnik uwzględniający przyrost przemieszczeń w czasie oraz na skutek łącznego działania efektu pełzania oraz zmiany wilgotności.

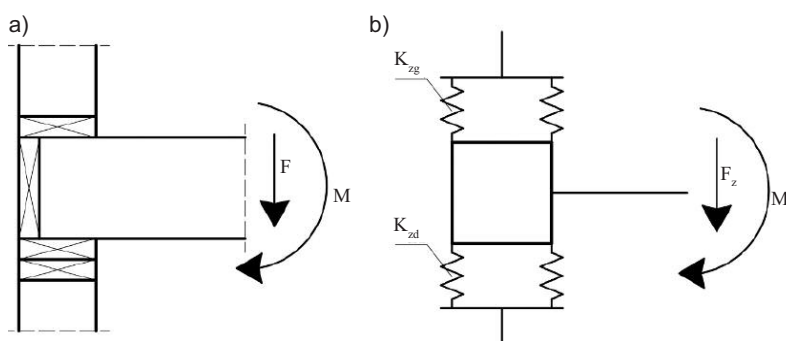


Fig. 3. Deformations of linear connections: a) structure; b) static diagram [5]
 Rys. 3. Deformacje połączeń liniowych: a) konstrukcja; b) schemat statyczny [5]

Połączenia obciążone siłą i momentem charakteryzują się deformacjami liniowymi i obrotem węzłów (rysunek 3). Podstawę konstruowania połączeń prętowych stanowią proste połączenia na gwoździe, śruby lub kątowniki. Kolejnym rodzajem połączeń są połączenia na płytce (blachy) perforowane.

Sztywność na poszczególnych kierunkach można określić na podstawie następujących zależności:

$$\varphi_z = \frac{M_z}{K_z} \quad (3)$$

$$K_z = \frac{1}{\frac{1}{K_{zg}} + \frac{1}{K_{zd}}} \quad (4)$$

gdzie:

φ_z – sztywność obrotowa połączenia;
 K_{zg} – sztywność giętna pręta górnego;
 K_{zd} – sztywność giętna pręta dolnego.

Z modułów konstruuje się zazwyczaj 3 – 6-kondygnacyjne obiekty mieszkalne. Częstym rozwiązaniem stosowanym w budynkach wysokich jest wprowadzenie dodatkowej konstrukcji ramowej z drewna klejonego lub stali, na której opierane są poszczególne moduły. Zapewnia ona odpowiednią sztywność przestrzenną całej konstrukcji oraz zapobiega przekroczeniu wartości dopuszczalnych docisków pod słupkami najniższych kondygnacji. Konstruowanie budynków musi prowadzić do spełnienia Stanów Granicznych Nośności i Stanów Granicznych Użytkowania przez konstrukcję traktowaną jako

connections in particular. Modules are constructed in a skeletal or slab system with panels made of CLT. Figure 4a shows construction in a frame system, and Figure 4b in a plate system.

całość, jak i przez poszczególne elementy konstrukcyjne, wliczając w to przede wszystkim połączenia. Moduły konstruuje się w systemie szkieletowym lub płytowym z płyt wykonanych z CLT. Na rysunku 4a przedstawiono konstrukcję w systemie szkieletowym, a na rysunku 4b w systemie płytowym.

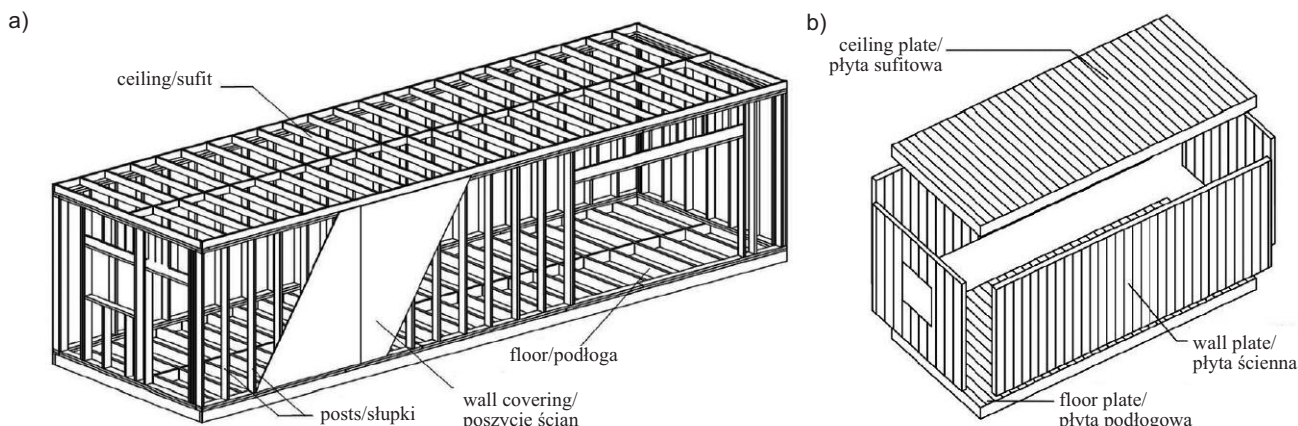


Fig. 4. Types of modular structures: a) frame system; b) panel system
Rys. 4. Rodzaje konstrukcji modułowych: a) system szkieletowy; b) system płytowy

Construction of modules in the frame system

It involves manufacturing the individual components and panels of walls, floors and ceilings, and then connecting them together. Nails, screws and staples are used as connectors of the components of the framework and sheathing. Occasionally, the sheathing is additionally glued to the framework. The structural joints between individual panels (wall, ceiling) transform the flat elements into spatial modules. Unlike traditional timber-frame construction, these connections, which are within a single module, are also made at the prefabrication stage, using screws, perforated metal sheets, plywood decking or screws.

Figure 5 shows two options for constructing the connection between walls and walls and modules, and Figure 6 shows two options for constructing the connection between the ceiling and ceiling.

The choice of a particular solution depends on the magnitude of the forces affecting the connection and the standard of construction solutions used by the contractor. Incorrectly designed connections between elements can result in premature exhaustion of the load-bearing capacity and destruction of the structural hot spot. The components of a module in a framing system are shown in Figure 7.

Vertical loads are transmitted primarily by the mutual pressure of the

Konstruowanie modułów w systemie szkieletowym

Polega ono na wytworzeniu poszczególnych składowych i paneli ściennych, podłogowych oraz sufitów, a następnie połączenie ich ze sobą. Jako łączniki części składowych szkieletu i poszycia stosuje się gwoździe, wkręty i zszywki. Czasem dodatkowo przykleja się poszycie do szkieletu. Połączenia konstrukcyjne pomiędzy poszczególnymi panelami (ściennymi, stropowymi) przekształcają płaskie elementy w moduły przestrzenne. W przeciwieństwie do tradycyjnego budownictwa szkieletowego, połączenia te, znajdujące się w obrębie jednego modułu, wykonuje się również na etapie prefabrykacji, wykorzystując wkręty, blachy perforowane, nakładki ze sklejki czy śruby.

Na rysunku 5 przedstawiono dwie możliwości skonstruowania połączenia między ścianami oraz ścianami i modułami, a na rysunku 6 dwie możliwości wykonania połączenia między stropem a sufitem. Wybór konkretnego rozwiązania zależy od wartości sił działających na połączenie oraz standardu rozwiązań konstrukcyjnych stosowanych przez wykonawcę. Niepoprawnie zaprojektowane połączenia pomiędzy elementami mogą skutkować przedwczesnym wyczerpaniem nośności i zniszczeniem niewralgicznego punktu konstrukcji. Elementy składowe modułu w systemie szkieletowym przedstawiono na rysunku 7.

Obciążenia pionowe przenoszone są przede wszystkim przez wzajemny docisk elementów. Równie ważne

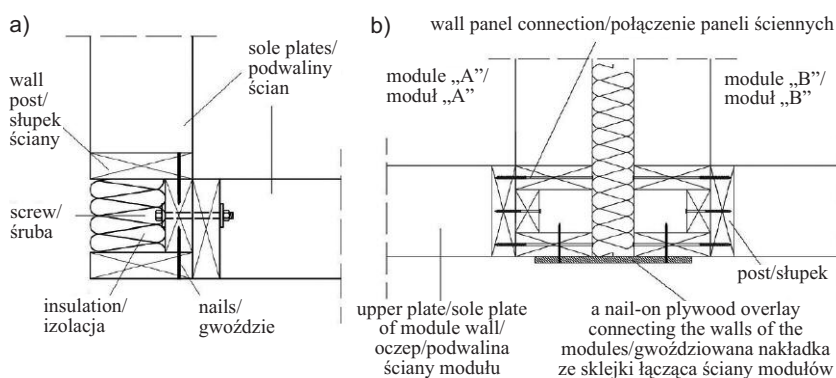


Fig. 5. Detail of connecting perpendicular wall panels: a) using nails and screws; b) using nailed overlays [5]

Rys. 5. Szczegół połączenia prostopadłych paneli ściennych: a) przy użyciu gwoździ i śrub; b) przy użyciu gwoździowanych nakładek [5]

elements. It is equally important to take into account the effects of wind. There are 4 possible patterns of structural failure resulting from wind action. These are: displacement; rotation; form deformation and tearing. It is all kinds of connections that are meant to ensure the integrity and stability of the entire structure. Depending on the geometry and loads acting in the elements of the structure, it may be necessary to further anchor the structure to the foundation in order to prevent exceeding the maximum lifting forces. In such cases, special solutions are used involving the introduction of an angle bar and additional steel ties, as in Figures 8 and 9. The individual structural elements, connections and buildings must meet the generally accepted conditions of limit states [20], as well as thermal and moisture, acoustic and fire protection requirements. When designing multifamily buildings or large-scale service facilities, it is important to prevent the occurrence of progressive collapse, module lifting and rotation, and consider the possibility of the emergence and consideration of alternative load flow paths during the failure of certain elements of the building structure. The used structural solu-

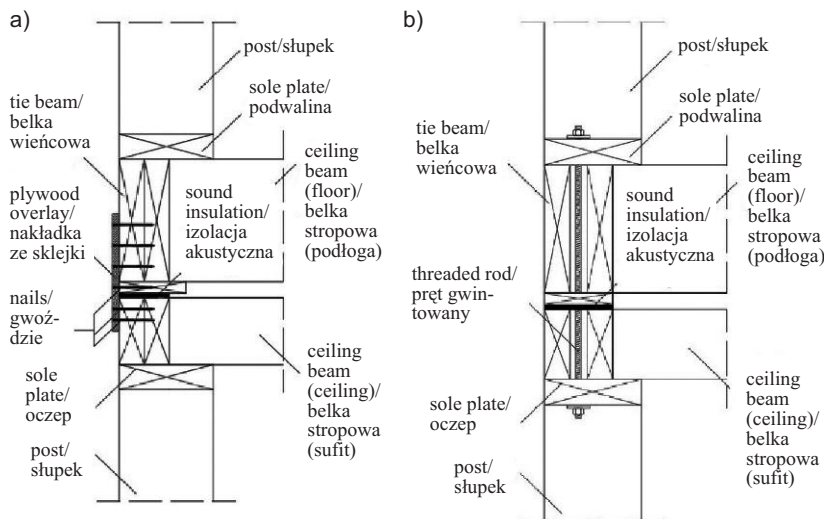


Fig. 6. Connections of the walls with the ceiling and the ceiling of the frame module: a) with nails and overlays; b) with screws [5]

Rys. 6. Połączenia ścian ze stropem i sufitem modułu szkieletowego: a) na gwoździe i nakładki; b) na śruby [5]

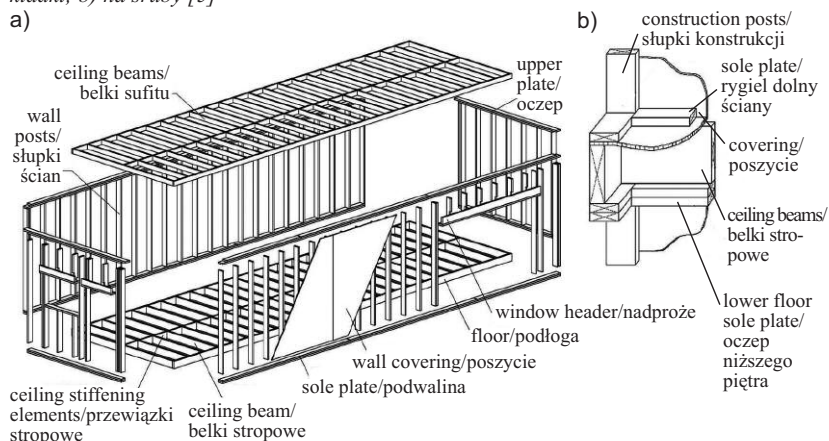


Fig. 7. The module in the frame system: a) module components; b) corner structure solution [5]

Rys. 7. Moduł w systemie szkieletowym: a) składowe modułu; b) rozwiązanie konstrukcji narożnika [5]

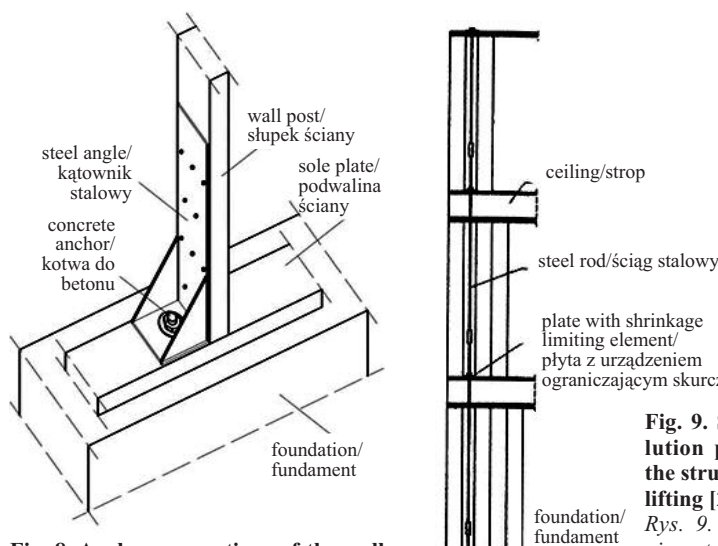


Fig. 8. Anchor connections of the wall panel post to the foundation [21]

Rys. 8. Połączenia kotwiące słupki panelu ściennego z fundamentem [21]

Fig. 9. System solution preventing the structure from lifting [22]

Rys. 9. Rozwiązanie systemowe przeciwdziałające podrywaniu konstrukcji [22]

jest uwzględnienie efektów oddziaływania wiatru. Wyróżnia się 4 możliwe schematy zniszczenia konstrukcji, będące skutkiem oddziaływania wiatru. Są to: przesunięcie; obrót; odkształcenie postaciowe i poderwanie. To właśnie wszelkiego rodzaju połączenia mają za zadanie zapewnienie integralności i stateczności całej konstrukcji. W zależności od geometrii i obciążeń działających w elementach konstrukcji może wystąpić konieczność dodatkowego zakotwienia konstrukcji do fundamentu w celu zapobiegnięcia przekroczenia maksymalnych sił podnoszących. W takich przypadkach stosuje się specjalne rozwiązania polegające na wprowadzeniu kątownika i dodatkowych ściągów stalowych, podobnie jak na rysunkach 8 i 9. Poszczególne elementy konstrukcyjne, połączeń i budynków muszą spełniać ogólne przyjęte warunki stanów granicznych [20] oraz wymagania ciepłno-wilgotnościowe, akustyki i ppoż. Przy projektowaniu budynków wielorodzinnych czy wielkopowierzchniowych obiektów usługowych należy zapobiegać wystąpieniu katastrofy postępującej, podnoszeniu i obrotowi modułów oraz rozważyć możliwość powstania i uwzględnienia alter-

tions should also take into account aspects of the accessibility of their individual components for connection on site and potential supervision.

Construction of modules in the plate system

Similarly to frame buildings, prefabrication of structures made of CLT can also involve the construction and on-site assembly of entire modules. In this case, a key role is played by appropriate connections between modules. They must be able to withstand shearing and tearing forces, such as those resulting from wind, as well as be easy to install on site. Modular construction with CLT is a fairly new technology, so there is little analysis of the inter-module connections [13, 17].

In the case of a panel system based on CLT, wood laths crossing in two directions form a complete panel section of the partition, as shown in Figure 10. In terms of joint design, this enables a significant degree of freedom in their arrangement and also ensures good redistribution of internal forces in the system.

Figures 11 and 12 schematically show the solutions for the connection of the structure composed of CLT panels to the foundation, as well as the connection between walls and ceilings. In order to ensure adequate thermal and acoustic insulation, layers of mineral wool, previously attached to the walls of the modules, are introduced. The structural elements and sensitive points of contact between the finish layers and the wooden structure are

natywnych ścieżek przepływu obciążeń podczas awarii niektórych elementów konstrukcji budynku. Stosowane rozwiązania konstrukcyjne powinny również uwzględniać aspekty dotyczące dostępności poszczególnych ich elementów w celu połączenia na budowie i ewentualnego dozoru.

Konstruowanie modułów w systemie płytowym

W analogii do budynków szkieletowych, prefabrykacja konstrukcji wykonanych z CLT może również obejmować konstruowanie i montaż na budowie całych modułów. W takim przypadku kluczową rolę spełniają odpowiednie połączenia pomiędzy modułami. Muszą one przenosić siły tnące oraz odrywające, będące skutkiem np. działania wiatru, jak również powinny być łatwe w montażu na placu budowy. Budownictwo modułowe z CLT jest dosyć nową technologią, dlatego też niewiele jest analiz połączeń międzymodułowych [13, 17].

W przypadku systemu płytowego bazującego na CLT, krzyżujące się w dwóch kierunkach lamele drewniane tworzą pełny przekrój płyty przegrody, co pokazano na rysunku 10. Pod względem kształtowania połączeń pozwala to na dużą swobodę w ich rozmieszczeniu, a także zapewnia dobrą redystrybucję sił wewnętrznych w układzie.

Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono schematycznie rozwiązania połączeń konstrukcji złożonej z paneli CLT z fundamentem oraz połączenia między ścianami i stropami. W celu zapewnienia odpowiedniej izolacyjności termicznej oraz akustycznej wprowadza się warstwy wełny mineralnej, wcześniej przymocowanej do ścian modułów. Elementy konstrukcyjne oraz newralgiczne punkty styku warstw wykończenia z konstrukcją

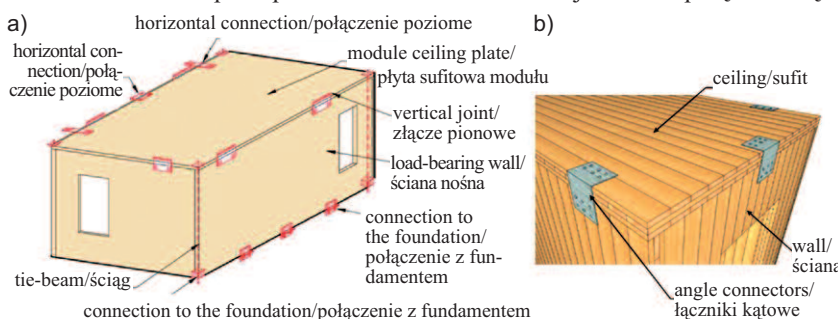


Fig. 10. Drawing of the module components in the slab system: a) module components [23]; b) connection of wall and ceiling elements
 Rys. 10. Rysunek składowy modułu w systemie płytowym: a) składowe modułu [23]; b) połączenie elementów ścian i stropu

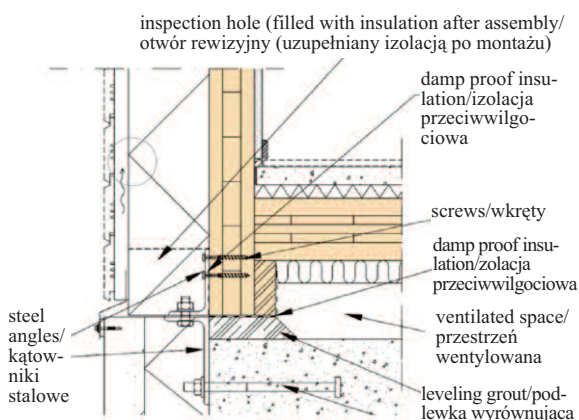


Fig. 11. Detail of the CLT module connection to the foundation using a joint made of angle bars [23]
 Rys. 11. Szczegół połączenia modułu z CLT z fundamentem za pomocą złącza wykonanego z kątowników [23]

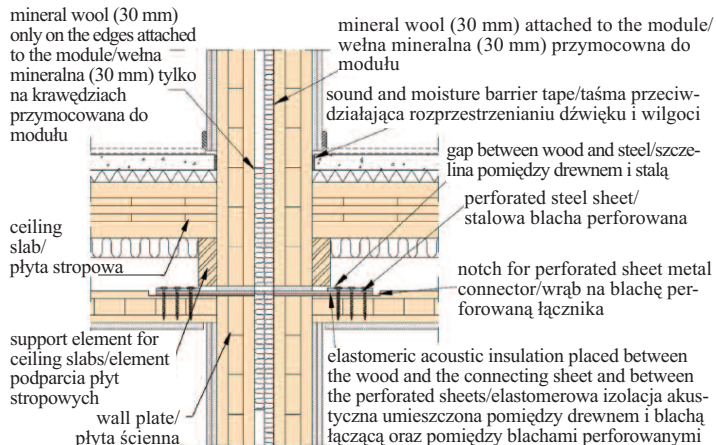


Fig. 12. Horizontal connection of the panel system in the module using perforated sheet metal, screws and acoustic insulation [23]
 Rys. 12. Połączenie poziome systemu płytowego w module z wykorzystaniem blachy perforowanej, wkrętów oraz izolacji akustycznej [23]

separated with special tapes to prevent the propagation of vibrations and sounds, as well as the ingress of moisture. These elements are shown in Figure 12.

Assembling

The modules that make up the building are assembled and placed on a previously prepared foundation. Self-propelled cranes are most often used, and the assembly is carried out directly by transferring the module from the truck trailer directly to the building under construction (known as wheel assembly). Tower cranes are used in the construction of very large structures only. Direct installation does not require additional storage space or time for reattaching slings and securing modules. As shown in Figure 1, the modules are transported using slings used from the beginning of the transport phase and moved using a traverse. The weight of a single module is 10 – 16 tons [24]. Slings positioned in such a way allow for stable holding of the three-dimensional structure, and the supporting reactions arising from them, occurring in the ceiling part, are close to the load pattern of the structure during the operation stage [24].

The work was carried out at the Białystok University of Technology under financing from the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Poland – project number WZ/WB-III/4/2023.

Received: 18.11.2024

Revised: 20.12.2024

Published: 21.02.2025

drewnianą oddziela się za pomocą specjalnych taśm zapobiegających propagacji drgań i dźwięków oraz przedostawaniu wilgoci. Elementy te zostały przedstawione na rysunku 12.

Montaż

Moduły tworzące budynek montuje się na wcześniej przygotowanym fundamencie. Najczęściej wykorzystywane są dźwigi samojezdne, a montaż odbywa się bezpośrednio przez przeniesienie modułu z naczepy ciężarówki wprost na powstający obiekt (tzw. montaż z kół). Żurawi wieżowych używa się wyłącznie przy budowie bardzo dużych obiektów. Bezpośredni montaż nie wymaga dodatkowego miejsca potrzebnego na składowanie oraz czasu na ponowne mocowanie zawiesi i zabezpieczanie modułów. Jak przedstawiono na rysunku 1, moduły transportowane są za pomocą zawiesi wykorzystywanych od początku fazy transportu i przenoszone przy użyciu trawersu. Waga pojedynczego modułu wynosi 10 – 16 ton [24]. Tak usytuowane zawiesia pozwalają na stabilne utrzymanie przestrzennej konstrukcji, a pochodzące od nich reakcje podporowe, występujące w części stropowej, są bliskie do schematu obciążeń konstrukcji w etapie eksploatacji [24].

Prace wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach projektu WZ/WB-III/4/2023 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego RP.

Artykuł wpłynął do redakcji: 18.11.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 20.12.2024 r.

Opublikowano: 21.02.2025 r.

Literature

- [1] Runkiewicz L, Szulc J, Sieczkowski J. Ewolucja budownictwa prefabrykowanego w Polsce. *Materiały Budowlane*. 2022; 4: 12 – 15.
- [2] Krause P. Energooszczędne budynki w technologii lekkiego szkieletu drewnianego. *Builder*. 2015; 6: 80 – 85.
- [3] <https://g-con.pl/aktualnosci/budownictwo-modulowe-w-polsce-jego-rozwoj-przepisy-rodzaje/> (18.11.2024).
- [4] Tokajuk A. Modułowy dom dostępny – nowoczesność i tradycja. *Teka Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych. Politechnika Lubelska* 2022; DOI: 10.35784/teka.3367.
- [5] Miedziałowski Cz, Malesza M. Budynki o szkielecie drewnianym z pozyciem. *Polska Akademia Nauk, Warszawa-Białystok* 2006.
- [6] Malesza J. Efektywny model analizy szkieletowych konstrukcji drewnianych, *Archives of Civil Engineering*. 2017 DOI: 10.1515/ace-2017-0019.
- [7] Miedziałowski C, Czech KR, Nazarczuk M, Kosior-Kazberuk M, Żakowicz A. Stiffness of Experimentally Tested Horizontally Loaded Walls and Timber-Framed Modular Building. *Materials*. 2023. DOI: 10.3390/ma16186229.
- [8] Huber J, Ekevad M, Girhammar U, Berg S. Structural robustness and timber buildings – a review. *Wood Material Science & Engineering*. 2019. DOI: 10.1080/17480272.2018.1446052.
- [9] Koskimes J. Inter-module connections in multi-storey modular timber buildings. *Aalto University*. 2022 – master thesis.
- [10] Srisangeerthanan S, Hashemi M, Rajeev P, Gad E, Fernando S. Review of performance requirements for inter-module connections in multi-story modular buildings. *Journal of Building Engineering Journal of Building Engineering* March. 2020. DOI: 10.1016/j.job. 2019.101087.
- [11] Omarsson S, Vessby J, Johansson M, Kua L. Numerical and Experimental Study on Modular-Based Timber Structures, Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings. 2019 DOI: 10.29173/mocs128.
- [12] Knuppe J. Robustness Of Modular Timber Buildings An investigation into alternative load paths in volumetric timber post and beam modules Delft University of Technology 2022 – master thesis.

- [13] Malo K, Abrahamsen R, Bjertnæs M. Some structural design issues of the 14-storey timber framed building „Treet” in Norway, *European Journal of Wood and Wood Products*. 2016. DOI: 10.1007/s00107-016-1022-5.
- [14] Mam K, Douthe C, Ray R, Consigny F. Shape optimization of braced frames for tall timber buildings: Influence of semi-rigid connections on design and optimization process. *Engineering Structures*. 2020 DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110692.
- [15] Loss C, Piazza M, Zandonini R. Connections for steel–timber hybrid prefabricated buildings. Part II: Innovative modular structures. *Construction and Building Materials*. 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.001.
- [16] Blass H, Laskewitz B, Load-Carrying Capacity of Joints with Dowel-Type Fasteners and Interlayers, *CIB-W18/33-7-6, meeting 33, Delft, The Netherlands* 2000.
- [17] Zhengyao L, Tsavdaridis K. Limited-damage 3D-printed interlocking connection for timber volumetric structures: Experimental validation and computational modelling. *Journal of Building Engineering*. 2023. DOI: 10.1016/j.job. 2022.105373.
- [18] Zhengyao L, Tsavdaridis K, Grandner L. A Review of Optimised Additively Manufactured Steel Connections for Modular Building Systems. *International Conference on Additive Manufacturing in Products and Applications Industrializing Additive Manufacturing AMPA 2020: Industrializing Additive Manufacturing* 357–373.
- [19] Dziarnowski Z, Michniewicz W. *Konstrukcje z drewna i materiałów drewnopochodnych*, Arkady, Warszawa 1974.
- [20] EN 1995-1-1 Część-1-1 Postanowienia ogólne. *Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków*.
- [21] <https://www.strongtie.pl/pl-PL/produkty/zlaczce-kotwiace-htt>, (23.07.2024).
- [22] *Materiały konferencyjne 16 października 2018 roku Insytut Technologii Drewna, Poznań – Budownictwo drewniane – trendy i wyzwania Konferencja naukowo-techniczna.*
- [23] *Stora Enso Building Systems by Stora Enso 3–8 Storey Modular Element Buildings 2016 Version 4.0* <https://www.storaenso.com/-/media/Documents/Download-center/Documents/Product-brochures/Wood-products/Design-Manual-A4-Modular-element-buildings20161227finalversion-40EN.pdf> (18.11.2024).