

dr inż. Dorota Kram, prof. PK<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0003-3580-7237

dr inż. Katarzyna Nowak<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0003-4902-4751

mgr inż. Klaudia Śliwa-Wieczorek<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-4148-1491

dr inż. arch. Hanna Hrehorowicz-Gaber, prof. PK<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0002-1567-6172

dr hab. inż. arch. Rafał Błazy, prof. PK<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0002-0466-8855

mgr inż. arch. Alicja Hrehorowicz-Nowak<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0002-4664-9740

dr inż. arch. Jakub Błachut<sup>2)</sup> ORCID: 0000-0002-8523-1910

dr inż. arch. Mariusz Łysień<sup>2)</sup> ORCID: 0000-0002-7500-4036

dr inż. arch. Agnieszka Ciepela<sup>2)</sup> ORCID: 0000-0002-3280-4674

mgr inż. arch. Jerzy Dudek<sup>2)</sup> ORCID: 0000-0002-1541-9512

DOI: 10.15199/33.2023.12.06

**Streszczenie.** W artykule dokonano przeglądu i oceny dostępnych rozwiązań konstrukcyjnych oraz wybranych zagadnień fizyki budowli dotyczących budownictwa modułowego realizowanego na bazie drewna, które wpisuje się w trendy budownictwa zrównoważonego. Przedstawiono innowacyjną metodę łączenia elementów za pomocą poliuretanowych złączy podatnych (PZP), zdolnych do przenoszenia obciążeń i dużych deformacji z zachowaniem ich szczelności, która dodatkowo pozwala na demontaż konstrukcji. Porównano wartości współczynnika przenikania ciepła  $U$  [ $W/m^2K$ ] zewnętrznej pionowej przegrody modułu z drewna w zależności od zastosowanego rozwiązania.

**Słowa kluczowe:** budownictwo modułowe; konstrukcje drewniane; analiza cieplna; budownictwo ekologiczne; poliuretanowe złącza podatne.

**Abstract.** The article reviews and evaluates available construction solutions and selected building physics issues for modular construction based on wood, which meets the trends of sustainable construction. An innovative method of connecting elements using Polyurethane Flexible Joints (PZP) is presented, capable of carrying loads and large deformations while maintaining their tightness, which additionally allows for the disassembly of the structure. The values of the heat transfer coefficient  $U$  [ $W/m^2K$ ] were compared for the external vertical partition of the module depending on the solution used.

**Keywords:** modular construction; timber structures; thermal analysis; ecological building; polyurethane flexible joints.

Z względu na coraz większe zapotrzebowanie na obiekty edukacyjne, w wielu miastach Polski obserwuje się podejmowanie licznych inicjatyw tworzenia prywatnych żłobków i przedszkoli. Kraków jest dobrym przykładem obrazującym wzrost liczby placówek edukacyjnych dla najmłodszych. W latach 2021 – 2023 liczba ta zwiększyła się o 24 placówki [1]. Taka sytuacja stwarza na rynku budowlanym potrzebę stosowania rozwiązań szybkich w realizacji, a jednocześnie elastycznych pod względem formy architektonicznej i funkcjonalnej. Dodatkowo powinny one być zoptymalizowane pod względem kosztów i procesów technologicznych. Do takich roz-

wiązań należy budownictwo modułowe (ang. *modular construction*). Termin ten jest stosowany w odniesieniu do fabrycznej produkcji elementów przestrzennych (3D), czyli modułów, dostarczanych na budowę i łączonych w formę obiektu budowlanego. Pojedyncze moduły powstają z prefabrykowanych przegród (ścian, stropów, dachów – najczęściej o konstrukcji szkieletowej) scalanych w hali produkcyjnej i dostarczanych w miejsce wbudowania lub rzadziej scalanych na placu budowy. W porównaniu z tradycyjnymi metodami budowlanymi, budownictwo modułowe pozwala na obniżenie kosztów budowy [2, 3], jest ekologiczne i zrównoważone przez redukcję odpadów (zwłaszcza w przypadku budownictwa w cyklu zamkniętym) [4, 5] oraz charakteryzuje się dużą wydajnością wykonania i bardzo dobrą jakością [6]. Wyzwaniem dla budownictwa modułowego jest rozwijanie

zdolności adaptacyjnych do różnych zakresów użytkowania, konfiguracji zróżnicowanych brył budynków, elastycznego kształtowania wymiarów istniejących układów konstrukcyjnych oraz możliwość modyfikacji fasad i ich orientacji.

Wykorzystanie budownictwa modułowego w placówkach oświaty nie ogranicza się do budowy nowych obiektów, ale także sprawdza się w momencie zaistnienia konieczności szybkiego zapewnienia większej liczby miejsc, np. ze względu na liczny rocznik uczniów. **Przykładem wykorzystania budownictwa modułowego o konstrukcji drewnianej na dużą skalę jest projekt szkoły podstawowej i liceum w dzielnicy Westend we Frankfurcie**, który składa się z ok. 350 modułów, a cała budowa została ukończona w 24 miesiące. Obiekt został wykonany jako czasowy (okres użytkowania 5 – 10 lat) z możliwością

<sup>1)</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

<sup>2)</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Architektury

<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji:

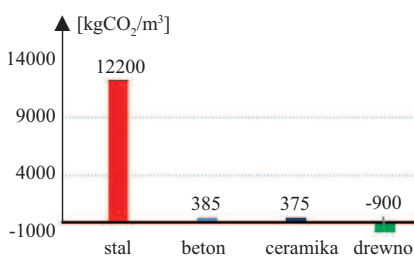
dorota.kram@pk.edu.pl

demontażu i ponownego wykorzystania w innej lokalizacji [7]. Na polskim rynku budowlanym przykładem może być **modułowe przedszkole ekologiczne nr 443 w Warszawie** o powierzchni 850 m<sup>2</sup> mieszczące 6 oddziałów, czy szkoła modułowa w Łomiankach o powierzchni 2800 m<sup>2</sup> [8].

W odpowiedzi na rosnące zapotrzebowanie na obiekty oświaty, jak również konieczność szybkiego i zrównoważonego budownictwa podjęto badania nad projektem systemu modułowych obiektów edukacyjnych (Zielonych Klas) w ramach programu Ministra Edukacji Narodowej pod nazwą „Nauka dla Społeczeństwa”. Celem programu jest stworzenie projektu modularnej i mobilnej przestrzeni oświatowej przyjaznej środowisku, z innowacyjnymi rozwiązaniami technologicznymi umożliwiającymi łatwą adaptację, rozbudowę lub zmianę sposobu użytkowania oraz możliwość demontażu i ponownego użycia modułów w innej lokalizacji.

## Rozwiązania materiałowo-konstrukcyjne

Budownictwo modułowe może być realizowane praktycznie na bazie wszystkich znanych materiałów budowlanych, tj. betonu, drewna, stali czy materiałów kompozytowych i rozwiązań hybrydowych. Za drewnem przemawia jednak jego niewielka waga, która przekłada się na redukcję masy całego modułu, zmniejszenie śladu węglowego w porównaniu np. z rozwiązaniami ze stali, łatwość obróbki i montażu czy możliwość recyklingu. Drewno jest przyjazne dla środowiska (zawartość CO<sub>2</sub> jest ujemna, co wiąże się z absorpcją dwutlenku węgla podczas wzrostu drzewa – rysunek 1) oraz można mówić, że jest „produktem odnawialnym” (fotografia).



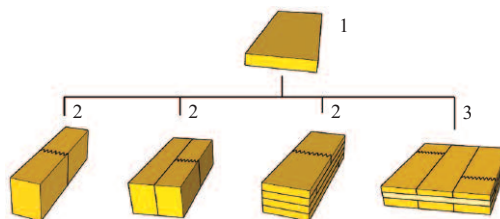
**Rys. 1. Zawartość CO<sub>2</sub> w podstawowych materiałach budowlanych na podstawie [11]**  
Fig. 1. CO<sub>2</sub> content in basic building materials based on [11]



**Drewno – materiał odnawialny wpisujący się w filozofię C2C „Cradle to Cradle” na podstawie [12]**  
*Wood – a renewable material that fits into the C2C philosophy “Cradle to Cradle” based on [12]*

Wykazano, że drewno ma korzystny wpływ na zdrowie i samopoczucie ludzi [9], a uczniowie mają w drewnianych klasach niewielki poziom stresu, mniej konfliktów i uzyskują lepsze oceny [10].

Elementy nośne modułów mogą być wykonywane z drewna litego lub w formie elementów klejonych czy łączonych mechanicznie, w formie prętów lub płyt (rysunek 2). Klejone mogą być nie tylko deski czy forniry (LVL), ale również włókna bardziej rozdrobnione.



**Rys. 2. Konstrukcyjne wyroby z drewna wg normy PN-EN 14080 [13]: 1 – tarcica; 2 – elementy prętowe (konstrukcyjne drewno na złącza klinowe, sklezione drewno lite, drewno klejone warstwowo); 3 – elementy płytowe (drewno klejone krzyżowo)**

*Fig. 2. Structural timber products according to the PN-EN 14080 standard [13]: 1 – boards; 2 – bar elements (structural finger jointed timber; glued solid timber; glued laminated timber); 3 – slab elements (cross laminated timber)*

Przegrody modułów są najczęściej realizowane jako prefabrykowane rozwiązania szkieletowe. Dużą popularnością zastosowania na elementy główne cieszy się konstrukcyjne drewno lite łączone wzdłużnie na złącza klinowe, w przypadku którego normą odniesienia jest PN-EN 15497:2014 [14]. Zaletą tego drewna, podobnie jak drewna klejonego warstwowo (ang. *glued laminated timber*), jest możliwość redukcji wad występujących w drewnie litym. W rozwiązaniach szkieletowych rozstaw ele-

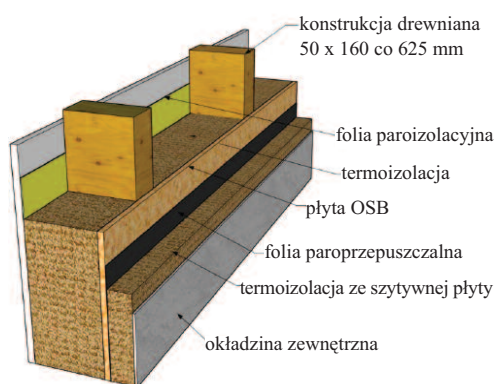
mentów konstrukcyjnych jest zazwyczaj podyktowany ograniczeniami wykończeniowymi. Najczęściej spotykany wymiar to 625 mm. Typowe przekroje elementów to szerokość 45 – 50 mm i wysokość 140 – 220 mm. Przykładowy widok przegrody pionowej o konstrukcji szkieletowej przedstawiono na rysunku 3.

Drewno klejone warstwowo umożliwia produkcję elementów o różnych przekrojach i długości, dlatego idealnie sprawdza się tam, gdzie konieczne jest przeniesienie dużych obciążeń

(w częściach otwartych, jako nadproża dużych przeszkleń itp). W przypadku zastosowania desek (lameli) o takiej samej wytrzymałości otrzymujemy drewno klejone jednorodne (oznaczone literą „h”), a stosując lamelę o dużej wytrzymałości na zewnętrznych strefach – drewno kombinowane (oznaczone literą „c”). Charakterystyczna wytrzymałość i parametry sztywności oraz gęstości podane są w normie [11]. Wysokość elementów jest krotnością wysokości pojedynczej lameli (standardowo 40 mm), a typowa szerokość to 80 mm – 220 mm ze skokiem 20 mm.

W rozwiązaniach płytowych najbardziej rozpowszechniony jest system CLT (ang. *cross laminated timber*), charakteryzujący się dwukierunkową pracą przy odpowiednich podparciach. Dokumentem odniesienia dla CLT jest PN-EN 16351:2021-08 [15]. Płyty można wykonywać w postaci prefabrykatów ściennych lub stropowych z przygotowanymi otworami pod stolarkę

okienną i drzwiową. W artykule [16] przedstawiono wyniki badania potencjału wykorzystania drewna CLT do budowy prefabrykowanych budynków szkolnych w Wielkiej Brytanii. Wykazano, że stosowanie CLT w obiektach edukacyjnych umożliwi uzyskanie korzyści środowiskowych, społecznych i komercyjnych. Przykładem zastosowania płyt CLT w sektorze oświaty jest również budowa przedszkola w Helsinkach. Obiekt jest realizowany. Będzie składał się z dwóch kondygnacji, a ilość wbu-



**Rys. 3. Przykładowa ściana szkieletowa o konstrukcji drewnianej**

*Fig. 3. An example of a timber frame wall*

wanego drewna wyniesie ok. 400 m<sup>3</sup> [10]. Ponadto w budownictwie modułowym można stosować płyty LVL, NLT, DLT, a także belki dwuteowe, w przypadku których pasy wykonywane są z drewna litego lub LVL, natomiast środnik z płyty OSB lub płyty pilśniowej.

Zaletą drewna jest **łatwość łączenia oraz kształtowania węzłów**. W przypadku rozwiązań prętowych i płytowych możliwe jest zastosowanie połączeń trzpieniowych, klejonych oraz hybrydowych. Wybór rozwiązania wpływa na pracę całego modułu (wartość modułu podatności złącza zależy m.in. od rodzaju łącznika czy zmiany temperatury i wilgotności). Ważne jest, aby projektowane połączenia zapewniły ciągłość pracy oraz bezpieczne przeniesienie sił na fundament. Kolejnym istotnym elementem przy wyborze złącza jest możliwość zapewnienia demontażu konstrukcji bez jej uszkodzenia i ponownego zmontowania w innej lokalizacji. Zapewniają to połączenia śrubowe oraz sworzniowe, ale sprzyjają zjawisku koncentracji naprężeń, które mogą doprowadzić do zniszczenia elementu. W artykule zaproponowano zastosowanie innowacyjnego połączenia klejonego, które zdolne jest do dyssypacji energii i równomiernego rozłożenia naprężeń w połączeniu.

Elementy z drewna litego i klejonego projektowane są wg PN-EN 1995-1-1:2010 (Eurokod 5) [17], a bezpieczeństwo konstrukcji należy zapewnić przez spełnienie stanów granicznych nośności (SGN) oraz użyteczności (SGU). W odniesieniu do elementów płytowych CLT, procedura projektowa, przedsta-

wiona w załączniku B normy [17], jest ograniczona do analizy elementów zginanych (metoda gamma). Nie ma jasnych i jednolitych wytycznych dotyczących projektowania złożonych węzłów czy elementów zespolonych drewniano-betonowych. Jeśli chodzi o projektowanie przepon ściennych, Eurokod 5 podaje dwie uproszczone metody (zalecaną A oraz B).

Projektowanie rozwiązań szkieletowych jest skomplikowane ze względu na konieczność uwzględnienia problemów związanych z tą technologią. Należy zweryfikować cztery mechanizmy uszkodzenia

budynku szkieletowego, tj. przesunięcie po fundamencie, obrót, utratę sztywności ścian oraz fragmentację budynku lub jego części. Pierwsze dwa zjawiska oraz fragmentacja są związane z oddziaływaniem wiatru na konstrukcję i małym ciężarem własnym. Weryfikacja sprowadza się do wykazania, że nośność połączenia jest większa od obciążenia wiatrem działającym na budynek. W przypadku obrotu należy zwrócić uwagę, że połączenie podwalin z fundamentem nie daje zabezpieczenia przed tym zjawiskiem. Konieczne jest zastosowanie dodatkowych złączy kotwiących elementy główne (słupki konstrukcji). Najtrudniejsze zagadnienie, to sprawdzenie, czy budynek szkieletowy będzie miał wystarczającą sztywność. W celu jej zapewnienia, a także wyeliminowania wybożenia słupków (przy odpowiednim zamocowaniu) stosuje się poszycie w formie płyt (najczęściej OSB), a siłę, jaką poszyta ściana jest w stanie przenieść, obliczamy zgodnie z rozdziałem 9.2.4 *Przepony ścienne* normy [17].

Stosowanie rozwiązań przestrzennych generuje problemy transportowe. Istotne jest więc zwrócenie uwagi na gabaryty modułu czy prefabrykowanej przegrody tworzącej moduł (w przypadku montażu w jednostki modułowe na placu budowy) na odpowiednio wczesnym etapie projektu.

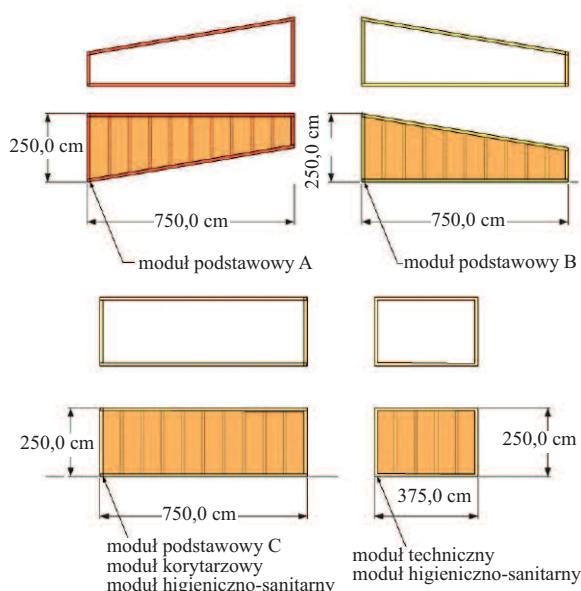
### System Zielonych Klas

W ramach programu Ministra Edukacji Narodowej pod nazwą „Nauka dla Społeczeństwa” opracowano projekt koncepcyjny złożony z kilku bazowych

modułów będących podstawą realizacji jednostki dydaktycznej. Celem prac jest stworzenie mobilnej przestrzeni oświatowej (nazwanej systemem *Zielonych Klas*) przyjaznej środowisku, z innowacyjnymi rozwiązaniami technologicznymi umożliwiającymi łatwą adaptację, rozbudowę lub zmianę sposobu użytkowania oraz możliwość demontażu i ponownego użycia modułów w innej lokalizacji. Badania prowadzone w ramach grantu miały na celu weryfikację możliwości realnego wykorzystania modułów Zielonej Klasy w różnej lokalizacji, o niejednorodnych uwarunkowaniach przestrzennych. Obszarem wytypowanym do analiz szczegółowych była gmina miejska oraz Kraków. Parametrem determinującym wybór placówki do badań szczegółowych była gotowość do podjęcia współpracy i umożliwienie przeprowadzenia warsztatów z uczniami w szkołach podstawowych oraz ponadpodstawowych. Warsztaty miały na celu zdiagnozowanie postrzegania obiektów edukacyjnych przez uczniów oraz poznanie ich oczekiwań i preferencji. Do badań szczegółowych wybrano 12 krakowskich szkół o zróżnicowanych uwarunkowaniach [18]. Uwzględniając obowiązujące przepisy prawne i formalne, rozważano wariantowo możliwość rozmieszczenia modułów Zielonej Klasy w poszczególnych lokalizacjach. Podczas opracowywania rozwiązań projektowych skupiono się na stworzeniu innowacyjnej konstrukcji modułowej, która ułatwi montaż i demontaż modułów Zielonych Klas w różnych lokalizacjach. Zaproponowano następujące elementy tworzące jednostkę dydaktyczną: moduł podstawowy (i) na planie trapezu (moduł A i B) oraz na planie prostokąta (moduł C) oraz moduł higieniczno-sanitarny (ii). Widok modułów z przykładową wizualizacją przedstawiono na rysunku 4 [18], natomiast na rysunku 5 proponowane układy modułów w konfiguracji prostej i złożonej, w zależności od liczby uczniów.

Gabaryty modułu dobrano tak, aby dawały duże możliwości kształtowania przestrzennego. W opinii autorów mniejsze wymiary modułów dają większą swobodę rozwiązań w trudnych warunkach lokalizacyjnych w porównaniu z dostępnymi na rynku modułami o du-





Rys. 4. Modułowy system Zielonych Klas – widok modułów podstawowych [18]  
Fig. 4. Modular Green Classroom system – view of basic modules [18]

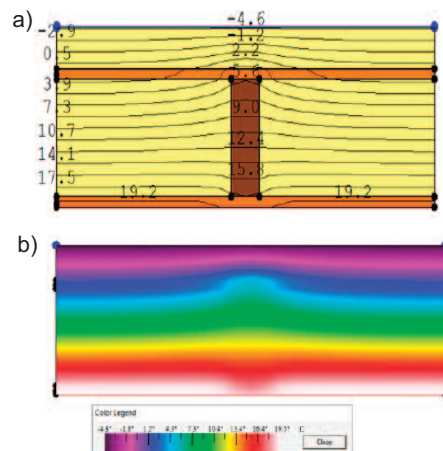
ści cieplnej. W przypadku zaproponowanych rozwiązań została przeprowadzona dwuwymiarowa analiza transportu ciepła w programie THERM 7.7, zgodnie z następującymi założeniami: (i) w układach warstw uwzględniono warstwy paroizolacyjne i wiatroizolacyjne pozwalające na uniknięcie kondensacji wewnętrznej pary wodnej wewnątrz przegrody; (ii) izolacyjność przegród oraz węzłów pozwala na uzyskanie odpowiednio dużej wartości czynnika temperaturowego  $f_{Rsi}$ ; (iii) przyjęto współczynniki przewodzenia ciepła materiałów termoizolacyjnych  $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$ . Jak wynika z tabeli,

Klasa dla 20 – 26 uczniów, powierzchnia klasy 51,84 m <sup>2</sup> , kubatura 160,7 m <sup>3</sup>	Klasa dla 24 – 30 uczniów, powierzchnia klasy 60,84 m <sup>2</sup> , kubatura 188,6 m <sup>3</sup>	Klasa dla 31 – 39 uczniów, powierzchnia klasy 78,84 m <sup>2</sup> , kubatura 244,4 m <sup>3</sup>
<b>Układ podstawowy</b>		
<b>Układ złożony</b>		

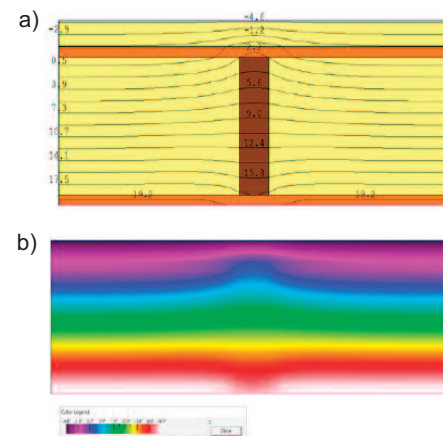
Rys. 5. Modułowy system Zielonych Klas – widok przykładowych rozwiązań w zależności od liczby uczniów (opracowanie autorów)  
Fig. 5. Modular Green Classroom system – view of sample solutions depending on the number of students (prepared by the authors)

gości 12 czy nawet 16 m. W pierwszym etapie prac nad koncepcją modułu zwrócono uwagę na minimalną grubość przegrody pionowej w zależności od analizowanego rozwiązania (układ szkieletowy lub płytowy) przy spełnieniu minimalnych wymagań Warunków Technicznych [19] dotyczących izolacyjno-

w przypadku rozwiązań szkieletowych, przy założeniu dwóch typowych przekrojów słupów nośnych, tj. 45 x 140 mm lub 50 x 160 mm (na tym etapie bez weryfikacji wytrzymałościowej), grubość przegrody wynosi w obu przypadkach 214 mm i podyktowana jest spełnieniem wymagań cieplnych. Na rysunkach 6 – 8

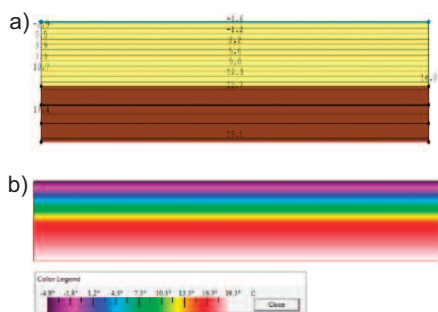


Ściana szkieletowa nr 1 wg tabeli (słupki drewniane 45 x 140 mm co 625 mm)  
Rys. 6. Przegroda nr 1: a) rozkład izoterm w przekroju poprzecznym ściany; b) rozkład pola temperatury w przekroju poprzecznym ściany  
Fig. 6. Partition No. 1: a) distribution of isotherms in the cross-section of the wall; b) distribution of the temperature field in the cross-section of the wall



Ściana szkieletowa nr 2 wg tabeli (słupki drewniane 50 x 160 mm co 625 mm)  
Rys. 7. Przegroda nr 2: a) rozkład izoterm w przekroju poprzecznym ściany; b) rozkład pola temperatury w przekroju poprzecznym ściany  
Fig. 7. Partition No. 2: a) distribution of isotherms in the cross-section of the wall; b) distribution of the temperature field in the cross-section of the wall

przedstawiono rozkład izoterm i temperatury w przekroju w przypadku przegród z tabeli. W związku z tym, że rozwiązania płytowe (CLT) nie są w Polsce zbyt popularne, a obróbka płyt wymaga odpowiedniego zaplecza technologicznego (np. cięcie CNC), zdecydowano, że dalsze prace będą dotyczyły rozwiązań modułów w formie przegród szkieletowych.



Ściana drewniana nr 3 wg tabeli (panel CLT)  
**Rys. 8. Przegroda nr 3: a) rozkład izoterm w przekroju poprzecznym ściany; b) rozkład pola temperatury w przekroju poprzecznym ściany**

Fig. 8. Partition No. 3: a) distribution of isotherms in the cross-section of the wall; b) distribution of the temperature field in the cross-section of the wall

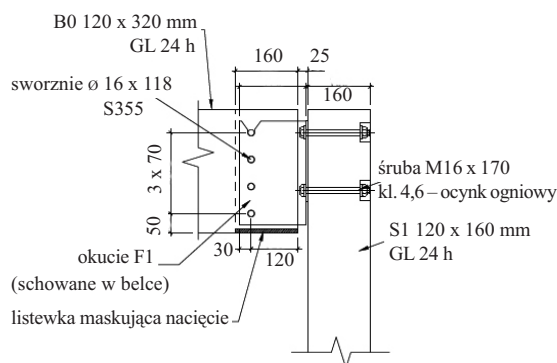
**Analiza cieplna przegród modułów z uwzględnieniem wybranych typów konstrukcji nośnej**  
 Thermal analysis of module partitions taking into account selected types of supporting structure

Nr ściany	Rodzaj przegrody zewnętrznej	U [W/m <sup>2</sup> K] w przypadku max = 0,20 W/m <sup>2</sup> K	Grubość ściany [mm]
1	ściana szkieletowa (drewno): słupki 45 x 140 mm co 625 mm, ocieplenie zewnętrzne ciągłe 50 mm	0,20	214
2	ściana szkieletowa (drewno): słupki 50 x 160 mm co 625 mm, ocieplenie zewnętrzne ciągłe 30 mm	0,20	214
3	CLT – ściana drewniana (3 x 40 mm) – ocieplenie zewnętrzne ciągłe 140 mm	0,20	260

Analizę wytrzymałościową przeprowadzono przy następujących założeniach: ciężar własny poszycia (stropodachu) wraz z instalacjami max 0,8 kN/m<sup>2</sup>; ciężar własny przegrody zewnętrznej 0,6 kN/m<sup>2</sup>; obciążenie śniegiem do 3 strefy wg PN-EN 1991-1-3 przy max 300 m n.p.m. (Sk = 1,2 kN/m<sup>2</sup>); obciążenie wiatrem dla strefy I (kategoria terenu III) wg PN-EN 1991-1-4. Na potrzeby analizy wytrzymałościowej założono, że połączone moduły utworzą obiekt z ośmioma przestrzeniami dydaktycznymi (po cztery sale z modułem komunikacyjnym w środku) o prostej, prostopadłościennych bryle (nachylenie dachu założono jako  $\alpha < 5^\circ$ ). Ściany podłużne modułów (zamknięte, bez otworów okiennych) podzielono na sześć paneli ściennych, natomiast poprzeczne na dwa panele ściennie (wymiar panelu ściennego dostosowano pod płyty OSB, tj. 1250 mm). W przypadku takich założeń wymiary budynku wynoszą ok. 28 x 31 m. Przyjęto, że szkielet ścian będzie wykonany ze słupków o przekroju 50 x 160 mm z drewna litego klasy C24, a poszycie ścian z płyt OSB/3. Wyszczególniono dwa typy słupków: stan-

dardowy 50 x 160 mm oraz słupek narożny do przestrzeni otwartych modułów, do którego czołowo montuje się belkę oczepu (rysunek 9). Słupki standardowe zamodelowano jako przegubowe, a siłę poziomą zebraną z wysokości pojedynczego modułu rozdzielono po połowie (rysunek 10).

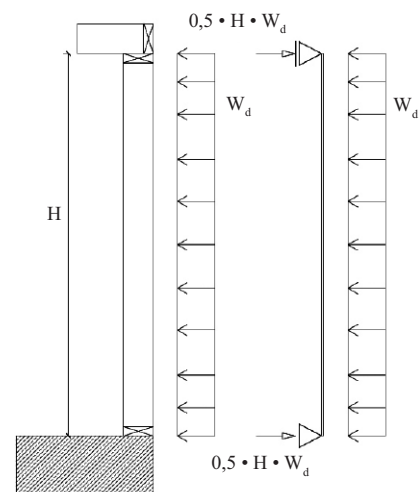
Wstępna weryfikacja nośności poziomych ścian usztywniających polega na wykazaniu, że suma działających obciążeń będzie mniejsza od sumy nośności ścian w danym kierunku. Nośność i-tej ściany zależy od nośności pojedynczego łącznika, długości ściany, rozstawu łączników oraz odpowiednich współczynników modyfikacyjnych zgodnie z Eurokodem 5. Zgodnie z wymaganiami nor-



**Rys. 9. Detal połączenia belki ze słupkiem modułu otwartego**

Fig. 9. Detail of the beam-column connection for the open module

my w celu weryfikacji zniszczenia na skutek obrotu lub utraty stateczności należy zastosować kombinację obciążeń w stanie EQU zgodnie z PN-EN 1990 [20]. Moduły otwarte zamodelowano jako układy ramowe złożone ze słupków narożnych z drewna klejonego o przekroju 120 x 160 mm oraz belki o przekroju 120 x 360 mm z drewna klejonego warstwowo GL24h. W przypadku belek oczepu jako ugięcie dopuszczalne przyjęto  $u_{dop} = l/250$ . Ugięcie długotrwałe obliczono przy założeniu pierwszej klasy

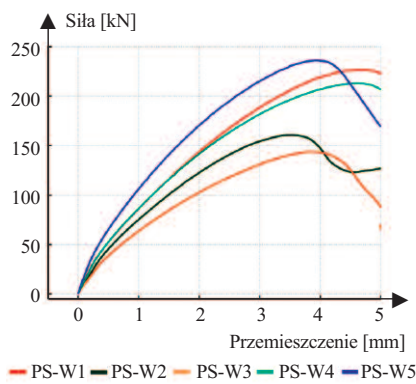


**Rys. 10. Schemat statyczny słupka**  
 Fig. 10. Static diagram of the post

użytkowania zgodnie z [18], a jego wartość wyniosła 23,8 mm. W projekcie rozważano zastosowanie innowacyjnego sposobu łączenia elementów za pomocą poliuretanowych złączy podatnych (PZP). Zaproponowano aplikację złącza w dwóch konfiguracjach: poziomej jako połączenie belek podwalinowych z fundamentem oraz pionowej jako łączenie pomiędzy modułami (słupek-słupek). Zaletą złącza

w porównaniu z łącznikami mechanicznymi jest brak występowania punktowych mostków termicznych oraz koncentracji naprężeń (naprężenia rozkładane są na całą powierzchnię klejnia). Dotychczasowe badania z wykorzystaniem PZP pokazują, że złącze to jest zdolne do przenoszenia dużych obciążeń i dużych odkształceń bez utraty szczelności [21 – 22]. Badania połączeń typu drewno-beton z użyciem PZP, przeprowadzone w próbie ścinania pomiędzy

plytami CLT a prefabrykowanym blokiem betonowym, pokazują potencjał zastosowania złączy do montażu belek podwalinowych z fundamentem (zdolność odkształcenia przy dużym obciążeniu), co obrazuje rysunek 11. Przy powierzchni klejenia wynoszącej 1200 cm<sup>2</sup> zniszczenie nastąpiło w połączeniu klejowym przy średniej sile wynoszącej  $F_{max} = 196$  kN, a średnie przemieszczenie osiągnęło wartość 4,12 mm [23].



**Rys. 11. Zależność siła – przemieszczenie w teście ścinania metodą push-out wg [23]**

*Fig. 11. The force-displacement relationship in the push-out shear test according to [23]*

Korzyścią płynącą z zastosowania PZP jest przede wszystkim możliwość demontażu modułu (rozcięcia) połączenia bez uszkodzenia elementów modułu oraz ponowne wykonanie połączenia. Dodatkowo złącza podatne umożliwiają produkcję prefabrykowanych elementów klejonych, co powinno wpłynąć na skrócenie czasu montażu na budowie.

W celu weryfikacji założeń dotyczących aplikacji PZP zaplanowano dalsze badania wytrzymałościowe w skali obrazującej realną szerokość oraz referencyjną długość skleiny (1 m) z dodatkowym obciążeniem odrywającym, jakie może wystąpić w wyniku obrotu panelu ściennego, co dotychczas nie zostało zbadane w przywołanych pracach).

## Podsumowanie

Prefabrykację stosowano z powodzeniem przy budowie szkół i innej infrastruktury publicznej w wielu krajach na całym świecie i wykazano, że pozwala ona na szybszą i bardziej opłacalną budowę tego typu budynków w porównaniu z wykonanymi w technologiach tradycyjnych [16]. W artykule analizie poddano dwa rozwiązania z zastosowaniem drewna: płytowe CLT oraz szkieletowe. Projektowanie obiektów modułowych z płyt CLT oraz szkieletowych wymaga od projektanta konieczności zwrócenia uwagi na problemy ściśle związane z technologią prefabrykacji (przesunięcie, obrót, utrata sztywności ścian oraz fragmentacja budynku).

W ramach projektu jako korzystne rozwiązanie do wdrożenia przyjęto drewniany szkieletowy układ konstrukcyjny. Przemawia za tym przede wszystkim większa

ostępność surowca w postaci prętów oraz łatwiejsza obróbka w porównaniu z rozwiązaniem płytowym. Moduł został zaprojektowany tak, aby w części otwartej wyeksponować estetyczne walory belek oczezu zaprojektowanych z drewna klejonego warstwowo (GL), natomiast ściany ze względów ekonomicznych zaproponowano w klasycznym układzie szkieletowym z drewna litego C24.

Rozwiązania systemowe mają wiele zalet, do których można zaliczyć przede wszystkim:

- skrócenie czasu budowy, a tym samym zmniejszenie kosztów, co potwierdza realizacja obiektu we Frankfurcie [7];
- łatwy demontaż paneli składających się na moduł oraz możliwość wtórnego wykorzystania dzięki zastosowaniu PZP (bez uszkodzeń elementów drewnianych);
- ograniczenie wpływu warunków atmosferycznych na proces budowy (możliwość wykonania większości prac w zakładzie prefabrykacji);
- zwiększenie bezpieczeństwa na placu budowy oraz precyzji montażu i łatwość kontroli;
- kontrolowany fabrycznie proces wytwarzania elementów prefabrykowanych generuje mniej odpadów na miejscu wbudowania.

## Literatura

- [1] [https://www.krakow.pl/aktualnosci/277569,34,komunikat,indeks\\_zdrowych\\_miast\\_2023\\_krakow\\_z\\_najlepsza\\_educacja.html](https://www.krakow.pl/aktualnosci/277569,34,komunikat,indeks_zdrowych_miast_2023_krakow_z_najlepsza_educacja.html) /dostęp 01.12.2023 r.
- [2] Bertram N, Fuchs S, Mischke J, Palter R, Strube G, Woetzel J. Modular construction: From projects to products. McKinsey & Company: Capital Projects & Infrastructure. 2019; 1 – 34.
- [3] Choi JO, O'Connor JT, Kim T. W. Recipes for cost and schedule successes in industrial modular projects: Qualitative comparative analysis. Journal of Construction Engineering and Management. 2016; [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.000117](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.000117).
- [4] Garusinghe GDAU, Perera BAKS, Weerapperuma US. Integrating circular economy principles in modular construction to enhance sustainability. Sustainability. 2023; <https://doi.org/10.3390/su151511730>.
- [5] Turner C, Oyekan J, Stergioulas LK. Distributed manufacturing: A new digital framework for sustainable modular construction. Sustainability. 2021; <https://doi.org/10.3390/su13031515>.
- [6] Hsu PY, Aurisicchio M, Angeloudis P. Risk-averse supply chain for modular construction projects. Automation in Construction. 2019; <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102898>.
- [7] <https://www.gmp.de/en/projects/3247/westend-modular-school-campus/> /dostęp: 30.11.2023 r.

[8] [https://ecologię.pl/realizacje-publiczne/?realization\\_kind=educational#filters-section/dostęp:30.11.2023 r.](https://ecologię.pl/realizacje-publiczne/?realization_kind=educational#filters-section/dostęp:30.11.2023.r)

[9] Kotradyova V, Vavrinsky E, Kalinakova B, Petro D, Jansakova K, Boles M, Svobodova H. Wood and its impact on humans and environment quality in health care facilities. International journal of environmental research and public health. 2019; doi: 10.3390/ijerph16183496.

[10] [https://www.storaenso.com/en/products/mass-timber-construction/building-concepts/school-buildings/dostęp31.11.2023 r.](https://www.storaenso.com/en/products/mass-timber-construction/building-concepts/school-buildings/dostęp31.11.2023.r)

[11] Nawrot J. Wpływ wyboru konstrukcji stropu w szkieletowych budynkach stalowych na poziom oddziaływania na środowisko. Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym. 2017. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2017.2.08>.

[12] Kram D. Drewno naturalnym surowcem współczesnego budownictwa. Czasopismo Techniczne. Architektura. 2011; 108 (2-A/1), 123-131. ISSN 1897-6271.

[13] PN-EN 14080:2013 Konstrukcje drewniane – Drewno klejone warstwowo i konstrukcyjne sklezione drewno lite – Wymagania.

[14] PN-EN 15497:2014 Konstrukcyjne drewno lite łączone na złącza klinowe – Wymagania jakościowe i minimalne wymagania produkcyjne.

[15] PN-EN 16351:2021 Konstrukcje drewniane – Drewno klejone krzyżowo.

[16] Koronaki A, Bukauskas A, Aftab J, Darshil US, Ramage MH. Prefabricated Engineered Timber Schools in the United Kingdom: Challenges and Opportunities. Sustainability. 2021; <https://doi.org/10.3390/su132212864>.

[17] PN-EN 1995-1-1:2010 – Eurokod 5 – Projektowanie konstrukcji drewnianych – Część 1-1: Postanowienia ogólne – Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków.

[18] Blazy R, Hrehorowicz-Gaber H, Błachut J, Ciepela A, Łysień M, Dudek J, Hrehorowicz-Nowak A. Planistyczne aspekty lokalizacji modułowego systemu Zielonej Klasy dla wybranych szkół na terenie Krakowa, Builder. 2023; <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.0135>.

[19] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz.U. 2022.1225.

[20] PN-EN 1990 – Eurokod 0 – Podstawy projektowania konstrukcji.

[21] Azinović B, Kramar M, Pazlar T, Sustersic I, Gams M, Kwiecień A, Weckendorf J. Experimental and numerical analysis of flexible polymer connections for CLT buildings. In Proceedings of the World Conference on Timber Engineering. 2018; Seoul, Republic of Korea (pp. 20-23).

[22] Pečnik JG, Gavrić I, Sebera V, Kržan M, Kwiecień A, Zajac B, Azinović B. Mechanical performance of timber connections made of thick flexible polyurethane adhesives. Engineering Structures. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113125>.

[23] Šliwa-Wieczorek K, Derkowski W, Binder E, Kwiecień A, Zajac B, Halilovic E, Lotinac S. 202, Shear Stiffness and Capacity of PolyUrethane Flexible Joint in Timber-Concrete Composites. In International Symposium of the International Federation for Structural Concrete. 2020; [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-32519-9\\_46](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-32519-9_46).

Przyjęto do druku: 20.11.2023 r.