

ROZDZIAŁ I

BADANIA EKSPERYMENTALNE DOTYCZĄCE EKOLOGICZNYCH KOMPOZYTÓW TERMOIZOLACYJNYCH ZAWIERAJĄCYCH ORGANICZNE WYPEŁNIACZE FIBROWE ORAZ SPOIWA WAPIENNE W PROCESIE TWARDNIENIA BEZ UŻYCIA METODY AUTOKLAWOWEJ

W celu osiągnięcia trwałego i stabilnego rozwoju każdego kraju i zachowania eksploatowanych przez kraj ekosystemów, wymaga się zwiększenia bardziej efektywnego wykorzystania zasobów naturalnych. W tym celu konieczna jest restrukturyzacja procesów produkcyjnych, poprzez opracowanie i wdrożenie innowacji ekologicznych w dowolnych sferach działalności człowieka. Jednakże, w sferze innowacji ekologicznych, występuje szereg „awarii” rynkowych i systemowych, zwłaszcza w motorze gospodarki każdego kraju – branży budowlanej. Prowadzi to do niedoinwestowania badań naukowych i technologii i w następstwie, do pogorszenia parametrów ekologicznych ekosystemów lokalnych i światowych, przeinwestowania budownictwa i wzrostu jego cen i ograniczonej dostępności. Dlatego też, aby zapewnić stabilne bodźce zarówno dla innowacji ekologicznych, jak i gospodarczych, należy wybrać odpowiednie instrumenty polityki ekologicznej, a także opracować przykłady możliwych rozwiązań naukowo-praktycznych, jakim poświęcony jest niniejszy projekt.

1.1 Metodyka badań

1.1.1 Główne kryteria doboru spoiw mineralnych i organicznych wypełniaczy fibrowych pochodzenia roślinnego

Celem niniejszych badań było uzyskanie materiałów kompozytowych zgodnie z następującymi kryteriami:

1. Ekologia.
2. Kinetyka wytrzymałości kompozytów w warunkach naturalnego twardnienia.
3. Możliwość wysokiej powtarzalności (odtwarzalności) w budownictwie w warunkach lokalnych bez użycia specjalnego, mało powszechnego sprzętu, skomplikowanych i pracochłonnych operacji technologicznych.
4. Wykorzystanie odnawialnych i (lub) dostępnych podstawowych składników mieszanki do produkcji kompozytu.
5. Minimalny negatywny wpływ na środowisko całego cyklu życiowego (LCA zgodnie z DIN ISO 14040 [1]) uzyskanego materiału, w stosunku do tradycyjnych materiałów (o dużej zawartości cementu lub o zwiększonej wytrzymałości (autoklawy)).
6. Zapewnienie, zgodnie z wymaganymi normami, właściwości termoizolacyjnych, z możliwością uzyskania współczynnika oporu przenikania ciepła dla konstrukcji odgrzewającej o grubości do 50 cm, równego $3,2 \text{ m}^2\text{C/W}$ (zgodnie z wymaganiami TAP 45-2.04-43-2006 [2]).
7. Zastosowanie w kompozycjach części materiałów z niewielką możliwością ewentualnego wykorzystania lub odpadów produkcyjnych.
8. Długotrwałość.
9. Aktywna termoregulacja.
10. Bezpieczeństwo przeciwpożarowe zgodne z normami regionalnymi.
11. Odpowiednia izolacja akustyczna i komfort akustyczny.
12. Mrozoodporność.

13. Odpowiednie właściwości technologiczne: przyczepność, urabialność itd.
14. Co najmniej 1,5 razy krótszy okres zwrotu w warunkach lokalnych w porównaniu do materiałów tradycyjnych.
15. Najbardziej obiecujące pod względem możliwości użycia w budowlanych materiałach kompozytowych są odpady zakładów chemicznych, żużel, popiół, glina nietechnologiczna, skały boczne, odpady z obróbki szkła, obróbki metali i stopów, odpady przemysłu ceramicznego, przemysłu silikatowego. Zastosowanie tych materiałów w budownictwie może odbywać się w dwóch kierunkach:

1. Biernym (utyliczacja odpadów, zmiana właściwości fizycznych z nieznacznym wpływem na chemiczne procesy twardnienia).

2. Aktywnym (udział w procesach chemicznych, jako komponent reagujący lub substancja wiążąca, ze znaczną zmianą właściwości fizyko-mechanicznych, nadanie specjalnych właściwości).

Pierwszy kierunek, w bardzo rzadkich przypadkach, pozwala użyć choćby połowę potencjału materiałów lub użytych w nich zasobów. Dlatego też głównym, nowoczesnym kierunkiem jest zastosowanie właśnie ich, jako aktywnych komponentów, np. spoiw.

W niniejszym badaniu, zgodnie z aktywnym kierunkiem, zastosowano szlam z procesu oczyszczania wody, uzyskiwany podczas szlifowania i polerowania szkła w jednej z lokalnych firm. W niektórych preparatach użyto spoiwa z cementu w minimalnej wymaganej ilości, w celu umocnienia struktury i zmniejszenia deformacji skurczowych w trakcie twardnienia.

Organiczne wypełniacze fibrowe pochodzenia roślinnego (paździerz lnu, słoma żytnia, słoma pszeniczna), zastosowane były zgodnie z biernym schematem zastosowania.

Paździerz lnu są praktycznie bezużytecznym odpadem produkcji włókien lnu z niewielką możliwością ewentualnego wykorzystania (tylko jako paliwo).

Pochodząca z gospodarstw rolnych część słomy bezpośrednio na polu jest rozdrabniana i rozrzucona jako nawóz organiczny.

Większość słomy, w postaci rolek lub bel, dostarczana jest do gospodarstw hodowlanych, gdzie składowana jest w stertach i wykorzystywana do karmienia lub jako podściółka dla zwierząt. W praktyce, ze względu na duże rozmiary produkcji, do 30-45% słomy nie jest wykorzystywana i gnije na stertach pod gołym niebem, na polach lub na terenach gospodarstw hodowlanych. Takie przechowywanie prowadzi do gnicia słomy i jej wzrostu po zakończeniu sezonu zimowego. W wyniku takiego przechowywania, znaczna część słomy staje się bezużyteczna i nie może być dalej używana.

1.2 Program eksperymentalny

Na podstawie wyników wstępnych badań eksperymentalnych wybrano najbardziej rokujące struktury i stworzono program, który przedstawia tabela 1.2. Zbadano gazofibrobetony termoizolacyjne i fibrobetony konstrukcyjno-termoizolacyjne z nieszczelnym opakowaniem. Jak pokazuje tabela 1.1, wszystkie rodzaje prób doświadczalnych stanowią materiały kompozytowe z przeważającą zawartością wapna, lnianych paździerz i słomy. Przyjęto hipotezę roboczą mówiącą o tym, że badane kompozyty będą zgodne z kryteriami, ustanowionymi na etapie przeglądu i przygotowania do badań eksperymentalnych, wymienionymi w punkcie 1.1.1.

Głównymi rodzajami spoiw, używanych przy produkcji próbek (zgodnie z warunkami projektu) były: spoiwa wapienno-glinowo-krzemionkowe, wapienno-krzemionkowe i wapienno-cementowo-krzemionkowe (mieszane).

Tabela 1.1 Nazwy i ogólna charakterystyka składu kompozytów termoizolacyjnych i konstrukcyjno-termoizolacyjnych

Nr serii	Nazwa materiału	Podstawowe komponenty	Oczekiwana gęstość w stanie suchym, ρ kg/m ³
F R G - 1ALS	Wapienno-glino-krzemianowy konstrukcyjno-termoizolacyjny fibrobeton z organicznymi fibrowymi wypełniaczami pochodzenia roślinnego	Wapno palone, proszkowe, hydratyzowane. Metakaolin, Si – zawierające odpady pochodzące z oczyszczania wody (drobny lub mielony piasek kwarcowy), paździerze lnu, słoma, alkalia, szkło wodne	700-1000
F R G - 2LS	Wapienno-krzemiankowy konstrukcyjno-termoizolacyjny fibrobeton z organicznymi wypełniaczami pochodzenia roślinnego	Wapno palone, proszkowe, hydratyzowane. Si – zawierające odpady pochodzące z oczyszczania wody (drobny lub mielony piasek kwarcowy), paździerze lnu, słoma, szkło wodne.	600-1000
F R A - 3CLS	Nieautoklawowy wapienno-krzemionkowy gazofibrobeton na spoiwie mieszanym z organicznymi fibrowymi wypełniaczami pochodzenia roślinnego	Wapno palone, proszkowe, hydratyzowane. Cement portlandzki CEM I 42.5 R, Si – zawierające odpady pochodzące z oczyszczania wody (drobny lub mielony piasek kwarcowy), paździerze lnu, słoma, szkło wodne	350-550

F R A - 4LS	Nieautoklawowy wapienno-krzemionkowy gazofibrobeton na spoiwie wapiennym z organicznymi fibrowymi wypełniaczami pochodzenia roślinnego	Wapno palone, proszkowe, hydratyzowane. Si – zawierające odpady pochodzące z oczyszczania wody (drobny lub mielony piasek kwarcowy), paździerz lnu, słoma, wodne szkło, preparat gazotwórczy	350-550
----------------	--	--	---------

Tabela 1.2 Główne składniki mieszanin stosowanych w produkcji kompozytów termoizolacyjnych i konstrukcyjnych kompozytów termoizolacyjnych podczas przeprowadzania badań

Nr serii	Główne składniki mieszaniny									
	Wapno palone	Wapno hydratyzowane	Metakaolin	Si zawierające odpady z pochodzący z oczyszczania wody (drobny lub mielony piasek kwarcowy)	paździerz lnu	Słoma żytnia	Cement	Szkło wodne	Alkalia	Preparat gazotwórczy
FRG-1ALS	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-
FRG-2LS	+	+	-	+	+	+	-	+	-	-
FRA-3CLS	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+
FRA-4LS	+	+	-	+	+	+	-	+	-	+

1.3 Materiały. Charakterystyka i właściwości

1.3.1 Spoiwa

Spośród spoiw mineralnych, dostępnych na rynku lokalnym i zgodnych z wymaganiami projektu, można wyodrębnić następujące, możliwe do użycia:

1. Wapno różnego rodzaju,
2. Metakaolin,
3. Cement portlandzki,
4. Szkło wodne.

Głównym rodzajem spoiwa, stosowanym w projekcie, było wapno różnego typu, łączone z substancjami pomocniczymi, w celu ulepszenia właściwości fizyczno-mechanicznych oraz termicznych uzyskanych kompozytów.

Kompozycje spoiw złożonych, stosowanych przy produkcji kompozytów, dobrane zostały w taki sposób, aby wytrzymałość na ściskanie, określona na belkach o wymiarach 4x4x16 cm, zgodnie z GOST 310.1, GOST 310.4, była nie mniejsza niż 2MPa po 28 dobach, przy twardnieniu w warunkach naturalnych w temperaturze $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

1.3.1.1 Wapno

Główne właściwości wapna, stosowanego w doświadczeniach w celu uzyskania kompleksowego spoiwa mineralnego, przedstawione zostały w tabeli 1.3.

Tabela 1.3 Techniczne wskaźniki wapna (GOST 9179-77, STB EN 459-1-2007)

Nazwa wskaźnika	Wapno hydratyzowane bez dodatków	Wapno palone, proszkowe, bez dodatków	Wapno hydratyzowane
Aktywność (zawartość CaO + MgO), %	60<	70<	5-40
Aktywny MgO, nie więcej	–	5	6
Zawartość CO ₂ , % nie więcej	5	7	5
Wilgotność, %	5	2	2
Pozostałość na sicie d = 0,2, %	1,0	1,0	1,2
Przedział wytrzymałości próbek na rozciąganie, po co najmniej 28 dobach twardnienia, MPa	–	–	5

W związku z tym, że wapno stosowane jest jako główny składnik spoiwa mineralnego, to przeważnie używa się wapna hydraulicznego i wapna palonego mielonego. Możliwe jest również stosowanie wapna hydratyzowanego w mieszaninach z dodatkiem cementu. Najbardziej dostępnym rodzajem wapna w regionie jest wapno hydratyzowane i palone.

Na bazie wapna przygotowano spoiwa mineralne, które umownie można podzielić na następujące typy:

- spoiwa wapienno-glino-krzemionkowe, których schemat twardnienia podobny jest do cementu portlandzkiego;

- spoiwa wapienno-krzemionkowe, twardnienie których odbywa się poprzez proces karbonizacji i krystalizacji wodorotlenku wapnia, spowodowanej odparowaniem wody i tworzeniem krzemianu wapnia przy użyciu wapna palonego i reaktywności komponentów zawierających Si;
- spoiwa wapienno-cementowo-krzemionkowe, twardnienie których odbywa się poprzez skomplikowany mechanizm kosztem wszystkich ww. procesów.

1.3.1.2 Metakaolin

Techniczne wskaźniki metakaolinu (amorficzny krzemian glinu uzyskiwany dzięki obróbce cieplnej wzbogaconego kaolinu), przedstawione zostały w tabeli 1.4.

Tabela 1.4 Skład chemiczny i główne wskaźniki techniczne metakaolinu

Nazwa wskaźnika	Wartość
Al_2O_3 , %	43,8
SiO_2 , %	53,42
Fe_2O_3 , %	0,75
TiO_2 , %	0,58
CaO , %	0,45
Gęstość nasypowa, kg/m^3	304 ... 447
Powierzchnia właściwa, m^2/g	15

1.3.1.3 Szkło wodne

W badaniach głównych dotyczących termoizolacyjnych kompozytów włóknistych, w celu neutralizacji łatwo rozpuszczalnych substancji organicznych, znajdujących się w wypełniaczach włóknistych, zastosowano sodowe szkło wodne, produkowane przez „Domanowski Zakład Produkcyjno-Handlowy”, zgodnie z normami GOST 13078. Właściwości techniczne sodowego szkła wodnego zostały przedstawione w tabeli 1.5.

Tabela 1.5 Właściwości techniczne sodowego szkła wodnego

Nazwa wskaźnika	Wskaźnik
1	2
Wygląd zewnętrzny	Żółto-zielona gęsta ciecz, bez włączeń mechanicznych i zanieczyszczeń widocznych gołym okiem
Moduł krzemianowy	2,9
pH	11-12
Gęstość, g/cm ³	1,450-1,470
Zawartość Na ₂ O, %	8,7-12,2

1.3.2 Wypełniacze włókniste

Spośród dostępnych na rynku lokalnym organicznych wypełniaczy włóknistych pochodzenia roślinnego, można wyodrębnić następujące, odpowiednie do produkcji kompozytów:

1. Paździerz lnu.
2. Słoma żytnia.
3. Słoma pszeniczna.

Orientacyjny skład chemiczny organicznych wypełniaczy włóknistych pochodzenia roślinnego, których użycie do produkcji badanych kompozytów jest możliwe, podany został w tabeli 1.6.

Tabela 1.6 Skład chemiczny organicznych wypełniaczy włóknistych

Substancja	Zawartość substancji dla każdego rodzaju organicznych wypełniaczy włóknistych, %		
	paździerz lnu	słoma żytnia	słoma pszeniczna
1	2	3	4
Celuloza	43,2	40...49	35...38
Hemiceluloza	30,1	18...18,5	20...21
Lignina	24,4	22,9	12...14

Pentozany	–	27-28	–
Substancje ekstrahujące się	–	2...2,6	–
Białko surowe	–	–	0,41...0,81
Lipidy	–	–	1,47
Substancje rozpuszczone w alkoholu i eterze	–	–	4,2...5,3
Substancje rozpuszczone w gorącej i zimnej wodzie	–	–	4,3...5,6
Popiół	1,0	3,1...4,1	3,2...5,3
Woda higroskopijna	–	reszta	reszta
Pektyny	1	–	–

Uwagi do tabeli 1.6: skład chemiczny paździerz y lnu zależy od warunków pogodowych i obszaru uprawy lnu.

Średnia gęstość organicznych wypełniaczy włóknistych pochodzenia roślinnego w stanie nieutwardzonym mieści się w przedziale od 80 do 110 kg/m³.

Podczas wstępnego przeglądu stwierdzono, że najlepszym składem chemicznym, strukturą i trwałością, charakteryzuje się słoma żytnia i paździerze lnu, które były stosowane w doborze składu.

Słoma żytnia została użyta jako wypełniacz gruboziarnisty, a paździerze lnu – jako drobny wypełniacz. Stosunek gruboziarnistego i drobnego wypełniacza organicznego w mieszaniu zmieniał się na etapie optymalizacji mieszaniny, odpowiednio z 1:1 do 7:3. Optymalny stosunek paździerz y lnu i słomy żytniej w mieszaniu włóknistego wypełniacza, stosowanego w produkcji kompozytów, określony został jako 3:5.

Rozmiary cząstek paździerz y lnu były zmienne, o długości od 1 mm do 15 mm i grubości od 0,3 mm do 1,5 mm. Frakcja wynosiła nie więcej niż 5 mm i stanowiła około 50% uzyskanej objętości produktu.

Wstępne przygotowanie słomy żytniej, polegało na jej posiekaniu w sieczkarni bębnowej typu PCB-0.1. Długość posiekanych rurek słomy określono poprzez ustawienie regularnej odległości między stalowymi ostrzami na obracającym się bębnie sieczkarni. Zastosowano frakcję o długości 80 mm, przy czym część frakcji do 40 mm stanowiła 55%.

Przed użyciem organicznych wypełniaczy włóknistych dokonano ich modyfikacji chemicznej, w celu neutralizacji i częściowego usunięcia z nich substancji łatwo rozpuszczalnych, obniżających wytrzymałość otrzymywanych kompozytów. Badania odbywały się w środowisku wodorotlenku wapnia i roztworu ciekłego szkła.

W celu nasycenia włókna paździerza lnu jonami wapnia w badanych seriach (przykład FRA, FRG), skrawki lnu umieszczono w nasyconym roztworze wapna ($[Ca^{2+}] = 2 \cdot 10^{-2}M$) na 48 godz. Po impregnacji, paździerze były przemywane wodą i dodatkowo moczone w 30% roztworze wodnego szkła przez 1-2 godz. Następnie zostały wyjęte, wyciśnięte i podsuszone (rycina 1.1).



Rycina 1.1 Płukanie paździerzy lnu przed mineralizacją

1.3.3 Dodatki mineralne wypełniaczy

Zastosowane zostały w celu zmiany właściwości reologicznych mieszanki betonowej, zmniejszenia deformacji skurczowych, zmniejszenia współczynnika woda/cement (W/C) oraz regulacji właściwości fizyczno-mechanicznych otrzymywanych materiałów.

Spośród wypełniaczy dostępnych na rynku lokalnym, można wymienić następujące, z uwzględnieniem sposobu ich zastosowania:

1. Aktywne (wypełniacze typu I, udział w reakcjach chemicznych nie mniejszy niż 10%):

- piasek kwarcowy mielony (powierzchnia właściwa = 2000–3000 cm²/g),

- odpady z oczyszczania wody, powstałe podczas procesu szlifowania i polerowania szkła w jednym z lokalnych zakładów (rysunek 1.2), (Powierzchnia właściwa = 3100–5100 cm²/g). Mają formę drobnego proszku szklanego (>90%) w niewielkich, łatwo łamliwych bryłach o wilgotności 20-30%. Zachowanie powierzchni właściwej i wysoka aktywność chemiczna danego odpadu produkcji zauważalna jest w ciągu 14 dni od momentu powstania.



Rycina 1.2 Odpady z oczyszczania wody, utworzone w zbiornikach ściekowych, powstałe podczas procesu szlifowania i polerowania szkła, wykorzystywane przy produkcji próbek

2. Pasywne (wypełniacze typu II, udział w reakcjach chemicznych poniżej 10%):

- drobny myty piasek rzeczny z frakcją granulometryczną = 1,2-1,7.

1.4 Przygotowanie i przechowywanie próbek do badań

1.4.1 Próbki serii FRG (wapienno-glinokrzemianowy i wapienno-krzemianowy konstrukcyjno-termoizolacyjny fibrobeton z organicznymi wypełniaczami fibrowymi pochodzenia roślinnego)

Opracowany skład masy oraz współczynnik woda/cement zostały wskazane w tabeli 1.7.

Tabela 1.7 Skład próbek serii FRG-1ALS, FRG-2LS

Nr	Nazwa komponentu	Stosunek komponentów w %, dla próbek	
		FRG-1ALS	FRG-2LS
1	Wapno palone, proszkowe, bez dodatków	25,5	35
2	Wapno hydratyzowane, bez dodatków	2,5	3
3	Metakaolin	25	-
4	Odpady pochodzące z oczyszczania wody powstałe w procesie szlifowania i polerowania szkła (lub mielony piasek kwarcowy)	26	42
5	Paździerz lniane i słoma żytnia w stosunku 3:5 odpowiednio*	17*	17*
6	wodne szkło	3	3
7	NaOH	1	-
8	Woda/cement (W/C)	0.85	0,6

* wartość orientacyjna w zależności od charakterystyki wzrostu.

1.4.1.1 Technologia produkcji

Czynności przygotowawcze

Wapno palone, proszkowe, ilość odważona dla jednej partii są gaszone wodą w ilości równej jego masie. Słoma rozdrobniona jest w sieczkarni na grubość 2-8 cm. Paździerz lnu przesiewane są wstępnie przez sito vibracyjne z oczkami o wielkości 10 mm. Paździerz lnu oraz słoma przygotowywane są zgodnie z punktem 1.3.2. Następnie, wypełniacze włókniste, paździerz lnu i słoma łączone są w stosunku 3:5, przemywane i namaczone w 30% roztworze wodnego szkła na 1-2 godziny. Następnie zawartość zostaje wyjęta z roztworu, wyciśnięta i podsuszona.

Przygotowanie mieszanki

Przygotowana zostaje mieszanka składników, wymienionych powyżej, z uwzględnieniem ilości wody, użytej do gaszenia wapna.

Do betoniarki przeciwbieżnej (konstrukcja której zapobiega osadzaniu się włóknistych wypełniaczy na wale i łopatach) ładowane są:

1. metakaolin (dla składu FRG-1ALS),
2. odpady, powstałe podczas oczyszczania wody, otrzymywane przy procesie szlifowania i polerowania szkła (lub mielony piasek kwarcowy),
3. wapno z urządzenia do gaszenia wapna wraz z wodą.

Składniki są intensywnie mieszane do momentu otrzymania jednolitej homogenicznej masy, a następnie dodane zostają:

4. woda (z uwzględnieniem wody, dodanej razem z wapnem z urządzenia) z rozpuszczonymi w niej zasadami (dla składu FRG-1ALS),
5. paździerz lnu i słoma żytnia.

Mieszanka mieszana jest przez 120-360 sekund w mieszalniku przeciwbieżnym, a następnie zawartość wyładowywana jest do formy lub jest szalowana. Zmieniając zawartość wypełniacza

włóknistego w składzie mieszanki i, w zależności od sposobu układania i uszczelnienia, można tworzyć materiały kompozytowe, które w formie suchej posiadają gęstość od 600 do 1000 kg/m³ i większą. Dopuszczalne jest, w przypadku istnienia możliwości technicznych, gaszenie wapna w mieszalniku podczas przygotowywania początkowej mieszanki, poprzez zwiększenie czasu mieszania (jednocześnie zwiększa się temperatura mieszanki i poprawiają się parametry mechaniczne uzyskiwanego kompozytu). Najważniejszym elementem podczas przygotowywania mieszanki w dowolny sposób jest równomierne rozprowadzenie każdego surowca w całej masie bez powstawania grudek, co powinien zapewnić prawidłowo dobrany mieszalnik. Dlatego też przeważnie suche składniki są wstępnie przemieszywane, zarówno wszystkie osobno, jak i razem.

Czas wiązania otrzymanego materiału kompozytowego zależy od temperatury oraz aktywności składników mieszanki i wynosi z reguły od 7 do 40 dób w warunkach naturalnych przy temperaturze $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$, bez dodatkowego intensyfikowania w okresie letnim. W przypadku wyrobów o dużej grubości, które mogą być poddawane obróbce mechanicznej, należy do mieszanek o gęstości powyżej 750 kg/m³ wprowadzić dodatki, przyspieszające proces karbonizacji.

Proces wiązania (twardnienia kompozytu) może zostać zintensyfikowany, jeśli umieścimy go w komorze o temperaturze do 65°C, a następnie w komorze suszarniczej z temperaturą do 90°C, wyposażonej w automatyczny system kontroli wilgotności chłodziwa, który redukuje powstawanie szczelin.



Rycina 1.3 Próbkę serii FRG-1ALS, przygotowane w formach



Rycina 1.4 Próbkę FRG-1ALS, wypilowana z matrycy



Rycina 1.5 Próbkę FRG-2LS, przygotowane w drewnianej konstrukcji



Rycina 1.6 Powierzchnia próbki serii FRG-2LS o gęstości w stanie suchym 800-900 kg/m³



Rycina 1.7 Powierzchnia próbki serii FRG-2LS o gęstości w formie suchej 600-700 kg/m³

1.4.2 Próbkki serii FRA (nieautoklawizowany wapienno-krzemianowy gazofibrobeton ze spoiwem mieszanym i wapienno-krzemianowy gazofibrobeton ze spoiwem wapiennym z organicznymi fibrowymi wypełniaczami pochodzenia roślinnego)

Skład mieszanek (w % na podstawie wagi), użytych w celu uzyskania dwóch typów termoizolacyjnych gazobetonów, został przedstawiony w tabeli 1.8.

Tabela 1.8 Skład mieszaniny wyjściowej dla uzyskania próbek serii FRA-3CLS, FRA-4LS

Nr	Nazwa komponentu	Masowa ilość składników, %	
		FRA-3CLS	FRA-4LS
1	2	3	4
1	Wapno palone, proszkowe, bez dodatków	30,0	33,65

2	Wapno hydratyzowane bez dodatków	3,0	3,0
3	Cement portlandzki CEM I 42,5R	14,65	–
4	Odpady z oczyszczania wody, powstałe w trakcie szlifowania i polerowania szkła (lub mielony piasek kwarcowy)	34	44
5	Paździerz lnu i słoma żytnia w stosunku 3:5 odpowiednio	15*	16*
6	Płynne szkło	3	3
7	Puder aluminiowy PAP2	0,35	0,35
8	Woda/cement (W/C)	0.85	0,68

* wartość orientacyjna w zależności od charakterystyki wzrostu

1.4.2.1 Technologia przygotowania próbek Czynności przygotowawcze

Słoma zostaje rozdrobniona w sieczkarni na grubość 2-8 cm. Paździerz lnu przesiewane są wstępnie przez sito wibracyjne z oczkami 10 mm. Paździerz lnu oraz słoma przygotowywane są zgodnie z punktem 1.3.2. Następnie wypełniacze włókniste, paździerz lnu i słoma, łączone są w stosunku 3:5, przemywane i namaczane w 15-30% roztworze wodnego szkła na 1-2 godziny. Następnie mieszanka włóknistych wypełniaczy zostaje wyjęta z roztworu, wyciśnięta i podsuszona.

Przygotowanie mieszanki

Bazowa mieszanka, której skład został wymieniony w tabeli 1.8, została przygotowana w poniżej przedstawionej kolejności.

Do mieszalnika przeciwbieżnego (konstrukcja którego zapobiega osadzaniu się włóknistych wypełniaczy na wale i łopatach) ładowane są:

1. suche odpady z oczyszczania wody, powstałe w procesie szlifowania i polerowania szkła (drobny lub mielony piasek kwarcowy),

2. wapno palone, proszkowe bez dodatków,
3. puder aluminiowy,
4. Cement portlandzki CEM I 42,5R (dla składu FRA-3CLS).

Ww. składniki mieszane są w formie suchej przez 30-60 sekund, a następnie po zakończeniu mieszania dodawane są:

5. woda,
6. wcześniej przygotowana mieszanka paździerzylnu i słomy żytniej.

Składniki mieszanki mieszane są przez 60-75 sekund w mieszalniku przeciwbieżnym, a następnie wyładowywane są do formy lub szalowane. Najważniejszym elementem podczas przygotowywania mieszanki jest równomierne rozprowadzenie każdego surowca w całej masie bez powstawania grudek, co powinien zapewnić prawidłowo dobrany mieszalnik. Dlatego też, przeważnie suche składniki są wstępnie przemieszywane, zarówno wszystkie osobno, jak i razem.

Czas wiązania wyniósł 1-2 godziny. Czas wiązania zależał od temperatury oraz aktywności składników mieszanki i wynosił od 20 do 40 dób w warunkach naturalnych przy temperaturze $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$, bez dodatkowej intensyfikacji w okresie letnim. W przypadku wyrobów o dużej grubości, które mogą być poddawane obróbce mechanicznej, do receptur należy wprowadzić dodatki, przyspieszające proces karbonizacji.



Rycina 1.8 Próbkę serii FRA-3CLS
(nieautoklawizowany wapienno-krzemionkowy gazofibrobeton ze spoiwem mieszanym)



Rycina 1.9 Próbkę serii FRA-4LS
(nieautoklawizowany wapienno-krzemionkowy gazofibrobeton ze spoiwem wapiennym)



Rycina 1.10 Powierzchnia próbki serii FRA-4LS
(nieautoklawizowany wapienno-krzemionkowy gazofibrobeton ze spoiwem wapiennym)

1.5 Metody przeprowadzania badań

Właściwości mechaniczne i fizyczne badanych kompozytów zostały określone na podstawie przeprowadzonych badań, dotyczących próbek, przygotowanych w formach metalowych lub wyciętych z całości bloku, po upływie 28-40 dób. Przeprowadzone zostały badania minimum trzech próbek o takim samym rozmiarze, wchodzących w skład jednej serii.

Określenie odporności na ściskanie kompozytów odbywało się na podstawie badań próbek brył o długości żebra 100 mm, zgodnie z GOST 10180. W przypadku materiałów kompozytowych o dużej zawartości włókna i nieposiadających jasno określonego stopnia deformacji, wytrzymałość określana była zgodnie z GOST 17177-94 punkt 13, zgodnie z siłą przy 10% deformacji.



Rycina 1.11 Badanie sprężenia na próbkach – bryłach o długości żebra 100 mm

Wytrzymałość spoiw określona została zgodnie z GOST 310.1, GOST 310.4, na podstawie badań przeprowadzonych na próbkach belkowych o wymiarach 4x4x16 cm.



Rycina 1.12 Określenie wytrzymałości na zginanie i kompresji na próbkach belkowych

Gęstość kompozytów w formie suchej mierzono na próbkach; forma o regularnym kształcie geometrycznym zgodna była z wymogami GOST 12730.0 i GOST 12730.1.



Rycina 1.13 Suszenie próbek w piecu



Rycina 1.14 Ważenie próbek z dokładnością do 0,1 grama

Deformacje skurczowe materiałów wiążących zostały określone na podstawie wyników badań próbek o wymiarach $40 \cdot 40 \cdot 160$ mm i $50 \cdot 50 \cdot 200$ mm, zgodnie z wymogami normy STB 1570, a badanie deformacji materiałów kompozytowych przeprowadzone zostało poprzez bezpośredni pomiar deformacji na próbkach (masywach).



Rycina 1.15 Określenie deformacji skurczowych spoiw

Określenie poziomu przewodnictwa cieplnego opracowywanych materiałów kompozytowych przeprowadzone zostało zgodnie z normami STB 1618.

Próbki belkowe o wymiarach 40 · 40 · 160 mm oraz próbki w kształcie brył z długością żebra 100 mm przygotowywane były w formach metalowych. Próbki, bezpośrednio po przygotowaniu, w celu zabezpieczenia przed wyschnięciem, okrywane były folią polietylenową.

1.6 Wyniki badań eksperymentalnych i ich analiza.

Charakterystyka otrzymanych komponentów

Podstawowa charakterystyka opracowanych komponentów, na bazie paździerzy lnu oraz słomy żytniej, określona na podstawie badań serii testowych FRG-1ALS, FRG-2LS, FRA-3CLS, FRA-4LS, przedstawiona została w tabeli 1.9 i pokazana na rycinach 4.16, 4.17 i 4.18.

Tabela 1.9 Charakterystyka fizyczno-mechaniczna próbek serii FRG-1ALS, FRG-2LS, FRA-3CLS, FRA-4LS

Nr	Seria	Gęstość, ρ [kg/m ³]	Przewodnictwo cieplne w stanie suchym, λ W/mK	Wytrzymałość na ściskanie, $f_{c,28}$ N/ mm ²	Kurczliwość [mm/m] spoiwo /kompozyt	Grubość ściany, d_N dla $R = 3,2$ m ² C/W, [mm]	Ciezar niezbędny dla termoregulacji 1 m ² ściany, kg
1.	FRG-1ALS	770	0.21	1,5	3/7.0	640	490
2.	FRG-2LS	650	0.15	0,5	4/8.0	480	312
3.	FRA-3CLS	375	0.10	0,45	3/9.0	320	120
4.	FRA-4LS	435	0.11	0,28	4/14.0	355	155

Uwagi:

1. Właściwości próbek określone zostały po 28 dobach.
2. Przewodnictwo cieplne, grubość ściany i ciężar w warunkach rzeczywistych o zrównoważonej wilgotności materiałów kompozytowych i otaczającego środowiska, mogą być wyższe o 20%.
3. Wytrzymałość próbek serii FRG-2LS i FRA-4LS określono zgodnie z GOST 17177-94 pkt.13.

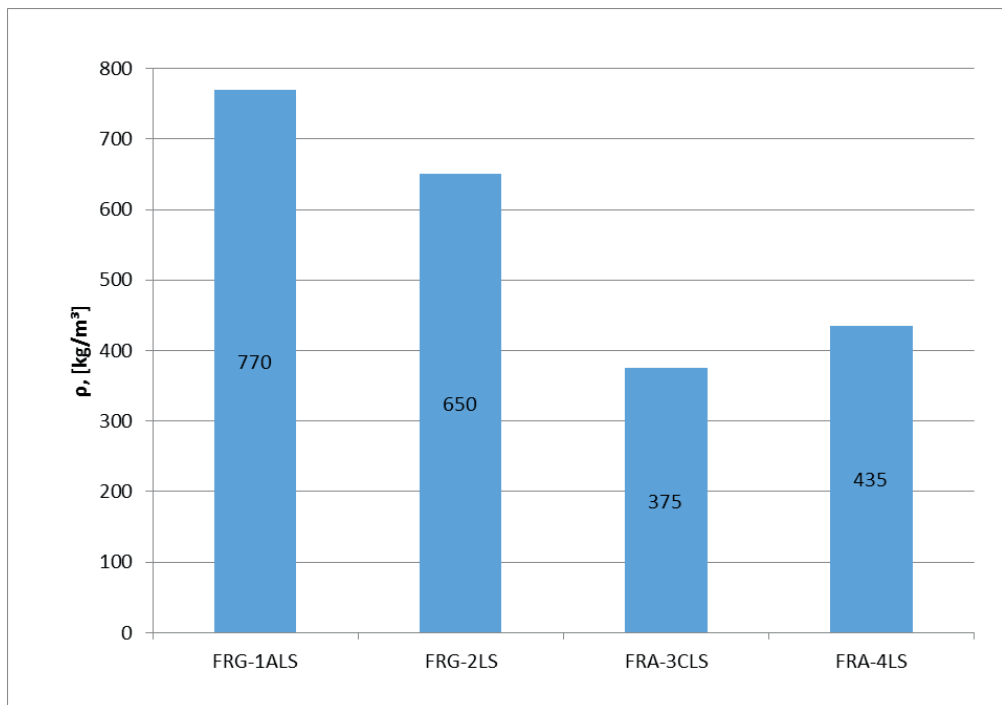
Otrzymane komponenty serii FRG-1ALS, FRG-2LS charakteryzowały się najwyższą gęstością i, co za tym idzie, najwyższym poziomem przewodnictwa cieplnego spośród wszystkich próbek, który w warunkach eksploatacji B, zgodnie z TKP 45-2.04-43-2006 [2], może wynosić $0,24 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$. Jednakże, kompozyty tych związków również charakteryzują się największą gęstością (przy gęstości w stanie suchym powyżej 750 kg/m^3), co pozwala na sklasyfikowanie ich jako materiałów konstrukcyjnych, które, oprócz własnego ciężaru, mogą także przyjmować dodatkowe obciążenie. Należy zauważyć, że, spośród wszystkich związków, te związki posiadają najmniejszą kurczliwość. W przypadku powyższych związków, zmieniając zawartość wypełniacza włóknistego i w zależności od technologii układania i uszczelniania, można stworzyć kompozyty o gęstości w stanie suchym od 600 do 1000 kg/m^3 , z wytrzymałością na ściskanie od $0,3 \text{ MPa}$ do $2,5 \text{ MPa}$.

Jednakże, dla uzyskania potrzebnego oporu cieplnego zgodnie z TKP 45-2.04-43-2006 [2], grubość ściany powinna mieścić się w granicach od 450 do 640 mm i więcej, co z kolei stanowi nieakceptowalny wynik względem kryteriów wskazanych w punkcie 1.1.1. Dany kompozyt może być stosowany jednak w konstrukcjach warstwowych z wydzieloną zewnętrzną warstwą termoizolacyjną, zwiększając stabilność temperatury pomieszczenia, kosztem dużej własnej pojemności cieplnej. Kompozyt typu FRG-2LS jest najprostszy pod względem technologii produkcji i jest najtańszy.

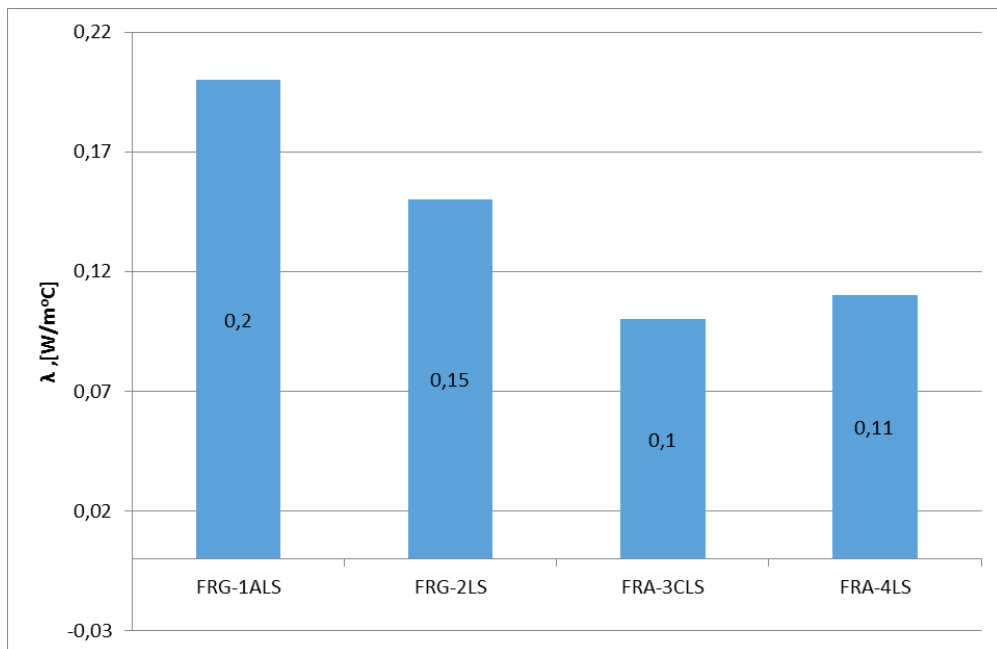
Otrzymany kompozyt serii FRA-3CLS charakteryzuje się niewysoką gęstością i, tym samym, niewysokim poziomem przewodnictwa cieplnego, który w warunkach eksploatacji B zgodnie z TKP 45-2.04-43-2006 [2], może wynosić $0,12 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$. Przy czym kompozyt tej struktury posiada niedużą wytrzymałość (do $0,6 \text{ MPa}$), co powoduje, że może być on tylko i wyłącznie materiałem termoizolacyjnym, który może przyjmować tylko obciążenie wielkości własnego ciężaru o ograniczonej wysokości. Dzięki zastosowaniu cementu w roli spoiwa materiał kompozytowy danej struktury posiada mniejszą kurczliwość i krótszy czas gęstnienia niż struktura serii FRA-4LS. Dla osiągnięcia wyma-

ganego oporu cieplnego zgodnie z TKP 45-2.04-43-2006 [2], grubość ściany może wynosić 320-380 mm, co jest akceptowalnym wynikiem w stosunku do kryteriów wymienionych w punkcie 1.1.1.

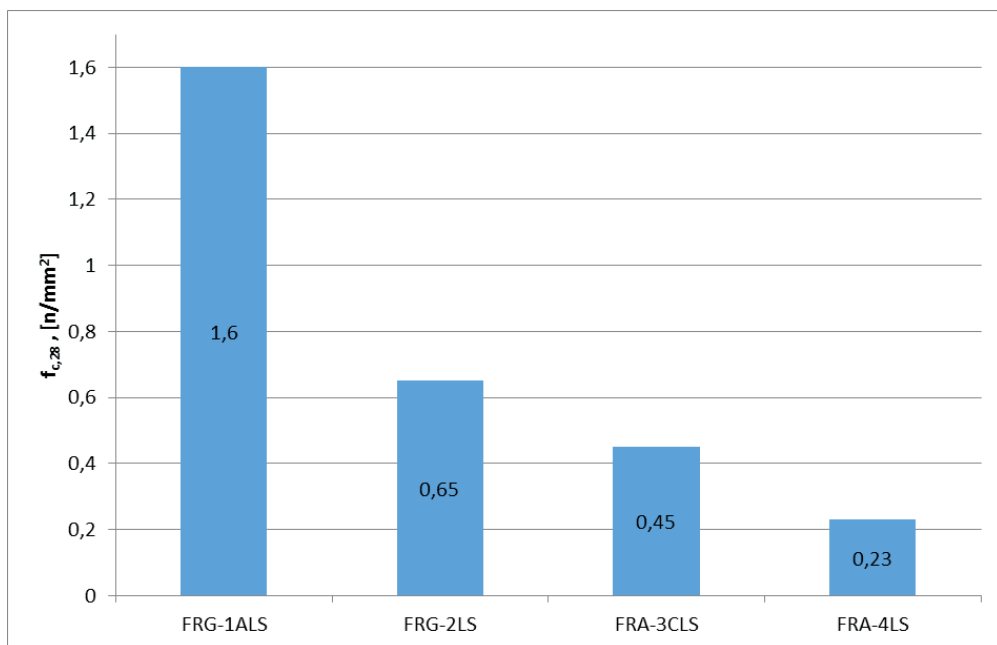
Otrzymany kompozyt serii FRA-4LS charakteryzuje się niewysoką gęstością i, tym samym, niewysokim poziomem przewodnictwa cieplnego, który w warunkach eksploatacji B zgodnie z TKP 45-2.04-43-2006 [2], może wynosić 0,14 W/m°C. Przy czym dany kompozyt, posiada najmniejszą ze wszystkich wytrzymałość (0,1-0,4 MPa), co powoduje, że może być on tylko i wyłącznie materiałem termoizolacyjnym, który może przyjmować tylko obciążenie wielkości własnego ciężaru o ograniczonej wysokości. Jednakże, dzięki brakowi cementu, dana struktura jest bardziej ekologiczna, ale posiada największą kurczliwość i dłuższy czas gęstnienia niż struktura serii FRA-3CLS. Dla osiągnięcia wymaganego oporu cieplnego, zgodnie z TKP 45-2.04-43-2006 [2], grubość ściany może wynosić 350-410 mm, co jest akceptowalnym wynikiem w stosunku do kryteriów wymienionych w punkcie 1.1.1.



Rycina 1.16 Średnia gęstość produkowanych kompozytów



Rycina 1.17 Średnia przewodność cieplna produkowanych kompozytów



Rycina 1.18 Zmiana wytrzymałości produkowanych kompozytów

1.7 Zalecenia dotyczące użycia opracowanych i zbadanych mieszanek

Skład mieszanin, stosowanych dla uzyskania kompozytów serii FRG-1ALS, FRG-2LS, jest odpowiedni przy produkcji ściennych bloków nośnych (o gęstości powyżej 750 kg/m^3). Są one porowatymi, konstrukcyjno-termoizolacyjnymi, ekologicznymi materiałami bez użycia cementu.

Kompozyt typu FRG-2LS, jest najprostszy i najtańszy w technologii produkcji. Kompozyt tego typu, o gęstości $600\text{--}700 \text{ kg/m}^3$, jest najbardziej skuteczny, gdy używa się go w zalecanej konstrukcji ściany, pokazanej na rycinach 1.19, 1.20.

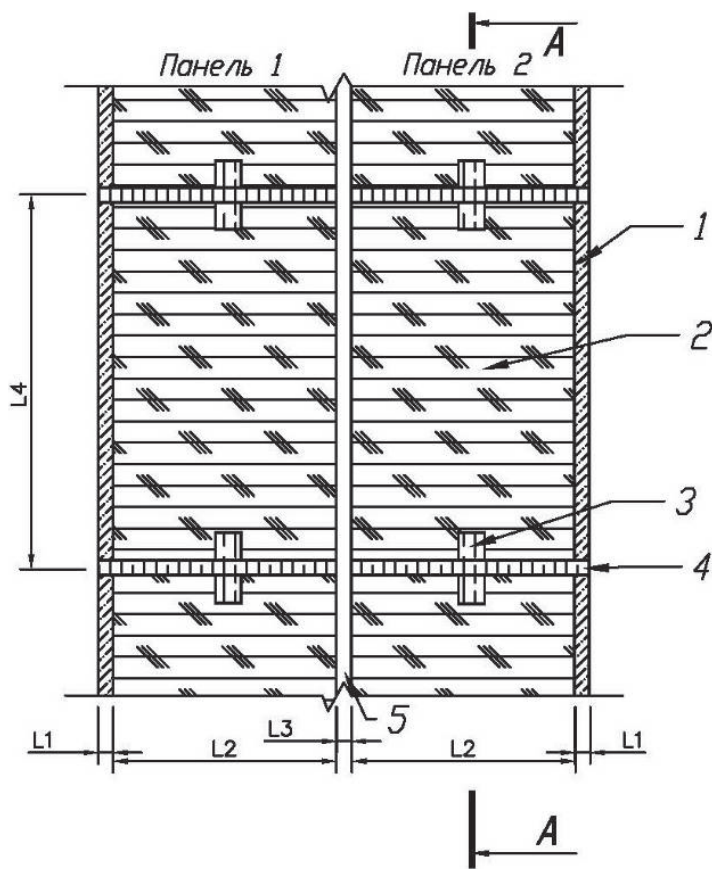
Kompozyt serii FRA-3CLS, jest odpowiedni do wytwarzania ściennych bloków nienośnych lub konstrukcji monolitycznych, zalewanych bezpośrednio na miejscu budowy. Jest wysoce porowatym materiałem termoizolacyjnym przy minimalnym użyciu cementu. Przy użyciu specjalnych środków technologicznych, może być stosowany w zalecanej konstrukcji ściany, pokazanej na rycinach 1.19, 1.20.

Kompozyt serii FRA-4LS jest odpowiedni do wytwarzania ściennych bloków nienośnych lub konstrukcji monolitycznych, zalewanych bezpośrednio na miejscu budowy. Jest wysoce porowatym materiałem termoizolacyjnym bez użycia cementu. Przy użyciu specjalnych środków technologicznych, może być stosowany w zalecanej konstrukcji ściany, pokazanej na rycinach 1.19, 1.20.

Zalecany wariant zewnętrznej ściennej konstrukcji odgradzającej w kilkupiętrowych domach jednorodzinnych

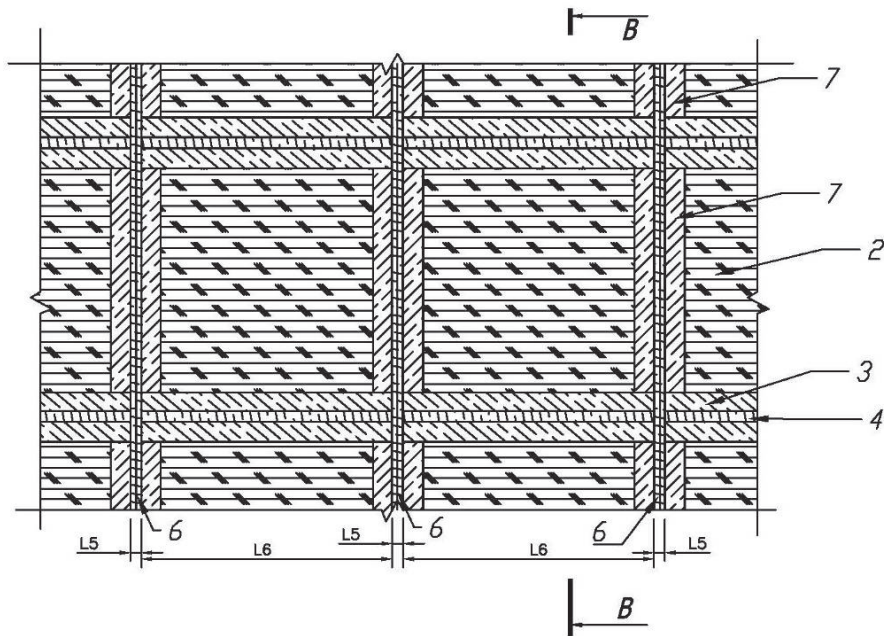
Powyższa konstrukcja ściany zewnętrznej w przekroju poprzecznym, przedstawia 2 panele tego samego typu, wyprodukowane w fabryce lub bezpośrednio w budowanym obiekcie, w cieplej porze roku. Płyty mogą być produkowane w położeniu horyzontalnym, przednią stroną (gruba warstwa wapienno-krzemianowa) do dołu lub do góry, zgodnie ze schematem technolo-

gicznym, ukazanym w punkcie 4.8 na rycinie 4.21. Po osiągnięciu wilgotności prawie równoważnej, płyty ustawiane są gęstą warstwą ochronną 1 na zewnątrz. Różnica między płytami zmniejsza wilgotność warstwy termoizolacyjnej kompozytu przy pierwszym użyciu. Płyty można wytwarzać w różnej grubości, w celu dokładnego zabezpieczenia niezbędnych właściwości przenoszenia ciepła w konstrukcjach w różnych rejonach.



Rycina 1.19 Przekrój poprzeczny ściany B-B

- 1 – Wapienno-krzemianowa warstwa zewnętrzna (wewnętrzna)
- 2 – Wewnętrzny wypełniacz z materiału kompozytowego serii FRG-1ALS, FRG-2LS, FRA-3CLS, FRA-4LS
- 3 – Poziome belki mocujące wypełniacz kompozytem termoizolacyjnym
- 4 – Elementy poziome konstrukcji płyty
- 5 – Warstwa powietrzna między płytami (10-20 mm) w celu usunięcia wilgoci



Rycina 1.20 Przekrój podłużny ściany A-A

- 2 – Wewnętrzny wypełniacz z materiału kompozytowego serii FRG-1ALS, FRG-2LS, FRA-3CLS, FRA-4LS
- 3 – Poziome belki mocujące wypełniacz kompozytem termoizolacyjnym
- 4 – Elementy poziome konstrukcji płyty
- 6 – Elementy pionowe konstrukcji płyty
- 7- Pionowe belki mocujące wypełniacz kompozytem termoizolacyjnym

Wymiary oznaczone na rycinach 1.19, 1.20:

L1 – grubość zewnętrznej (wewnętrznej) warstwy wapienno-krzemianowej (10-15 mm),

L2 – grubość wypełniacza z materiału kompozytowego jednej płyty (170-250 mm),

L3 – grubość warstwy powietrznej między płytami (10-20 mm) w celu usunięcia wilgoci,

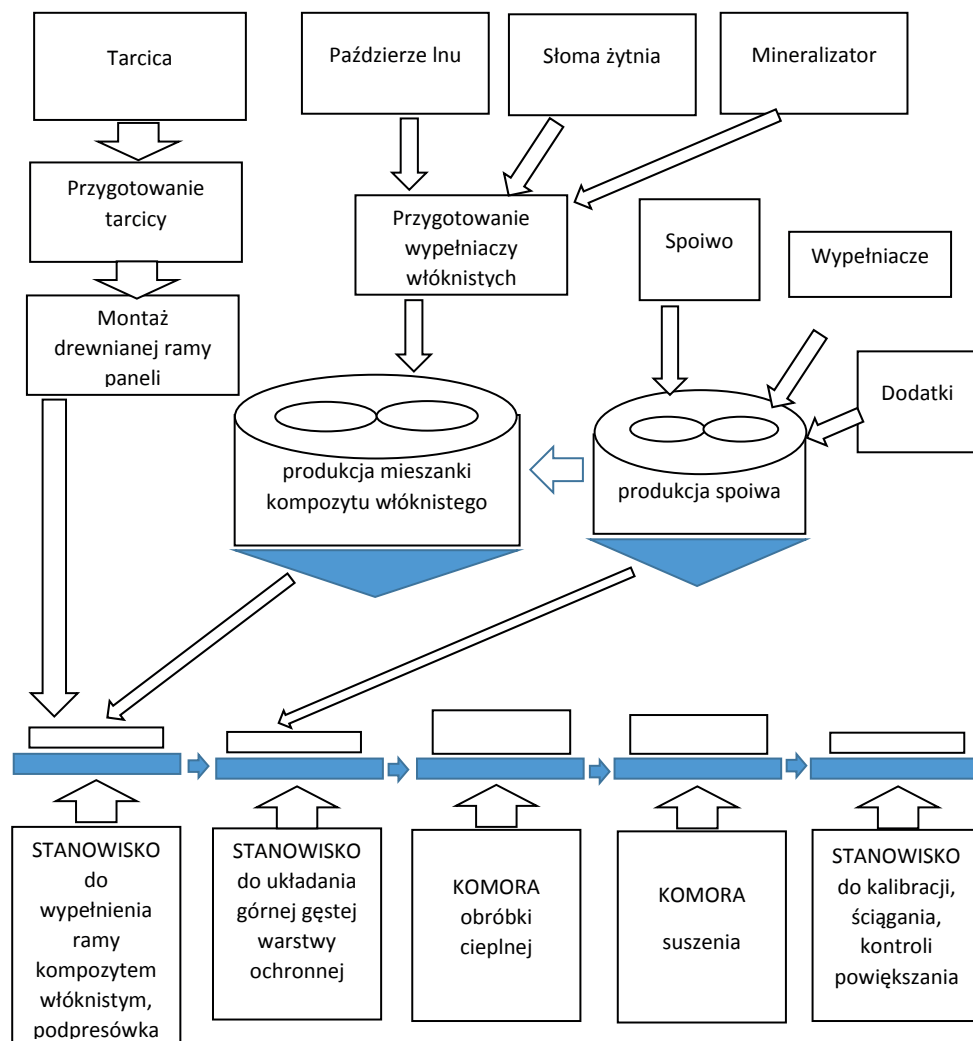
L4 – wysokość wypełniacza z materiału kompozytowego jednej komórki płyty (500-700 mm),

L5 – grubość wsporników, utworzonych z dwóch stron (30-50 mm),

L6 – szerokość wypełniacza z materiału kompozytowego jednej płyty (500-750 mm).

Powyższe rozwiązanie jest rozwiązaniem technologicznym, z punktu widzenia organizacji fabrycznej produkcji płyt i dużej prędkości wznoszenia z nich domów mieszkalnych.

1.8 Schemat technologiczny produkcji drewnianych paneli ściennych z wypełniaczem kompozytowym



Rycina 1.21 Schemat technologiczny produkcji paneli ściennych dla szkieletowej konstrukcji domu

Powyższy schemat technologiczny przewiduje następujące działania:

1. Przygotowanie drewnianego szkieletu:

- nacięcie drewna określonej długości;
- montaż elementów płaskich;
- montaż elementów objętościowych (paneli) z instalacją zdeformowanych wkładów dla zrekompensowania wilgotności skurczu;
- nawilżenie paneli objętościowych.

2. Przygotowanie środka wiążącego:

- dozowanie komponentów proszkowych;
- gaszenie wapna;
- mieszanie w mieszalniku;
- wydanie mieszaniny środka wiążącego w celu formowania warstwy ochronnej oraz do mieszalnika z włóknistą masą;

3. Przygotowanie mieszanki kompozytu włóknistego:

- siekanie słomy;
- przesiewanie paździerzy;
- mieszanie wypełniaczy włóknistych;
- przemywanie i mineralizacja włóknistej masy;
- mieszanie włóknistej masy oraz środka wiążącego;
- wydanie mieszaniny w celu formowania;

4. Formowanie paneli:

- układanie włóknistej masy;
- podpresówka;
- układanie warstwy ochronnej
- wygładzanie i (lub) wykończenie górnej powierzchni;

5. Obróbka cieplna paneli:

- ogrzewanie i konserwacja izotermiczna w komorze przyspieszającej twardnienie;
- suszenie w środowisku o kontrolowanej wilgotności dla zminimalizowania deformacji spowodowanych gradientem wilgotności;

5. Działania końcowe:

- kalibrowanie (ściągnięcie) paneli w celu kompresji wypełniacza wewnętrznego (w przypadku konieczności);
- kontrola wskaźników jakości poszczególnych paneli;
- wstępny montaż paneli (w przypadku konieczności).

Bibliografia

1. ISO 14040 (2006): Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. International Organization for Standardization (ISO).
2. TKPi 45-2.04-43-2006: Budowlana technika grzewcza. Projektowe normy budowlane.
3. Guinée (2001): Life cycle assessment. An operational guide to the ISO standards. Part 1: LCA in perspective. Part 2a: Guide. Part 2b: Operational annex. Part 3: Scientific Background. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM) and Centre of Environmental Science, Leiden, Nederlande.