



„Projekt otrzymał dofinansowanie z unijnego programu badań i innowacji „Horyzont 2020” na podstawie umowy grantowej nr 723916”



Innowacyjne komponenty prefabrykowane,
wykorzystujące różne odpady budowlane i rozbiórkowe,
redukujące zapotrzebowanie energetyczne budynku i
minimalizujące wpływ na środowisko

Podręcznik szkoleniowy

KOORDYNATOR



Spis treści

1. Wprowadzenie	4
1.1. Konsorcjum	4
1.2. Zarys projektu	4
1.3. Etapy InnoWEE	7
2. Opracowanie nowych materiałów i paneli	8
2.1. Przetwarzanie i wykorzystanie odpadów	8
2.2. Opracowanie geopoliimerów InnoWEE	13
2.3. Opracowanie paneli	16
2.4. Testy wydajności i trwałości w laboratorium	21
2.5. Certyfikacja innowacyjnych produktów	24
3. Pilotażowa instalacja i produkcja nowych paneli	25
3.1. Instalacja pilotażowa – Główne cechy	25
3.2. Definicja strategii skalowania	25
3.3. Mapa strategii skalowania	27
3.4. Projekt Wstępny	28
3.5. Szczegółowy projekt.....	37
3.6. Analizuj i Ulepszaj – Dane z produkcji.....	39
4. Instalacja, system monitorowania i ocena wydajności w rzeczywistych budynkach demonstracyjnych	43
4.1. Dom pilotażowy, teren CNR w Padwie, Włochy.....	43
4.2. Stary ratusz w Voula w Atenach, Grecja	46
4.3. Dom opieki Don Orione w Bukareszcie, Rumunia	49
4.4. Dom ekologiczny Putte, Belgia	51
5. Modelowanie energii w budynku (BEM) i wirtualnych obiektach demonstracyjnych.....	53
5.1. Ocena technologii i metod instalacji/demontażu oraz monitorowania paneli	53
5.2. Modelowanie charakterystyki energetycznej różnych produktów	56
5.3. Ocena higrotermiczna	65
5.4. Osiągnięcia InnoWEE i projekt dla każdego obiektu demo.....	67
6. Analiza cyklu życia – LCA	68
6.1. Metodologia LCA.....	68
6.2. Inwentaryzacja cyklu życia (LCI)	69
6.3. Ocena wpływu cyklu życia (LCIA).....	70
6.4. Interpretacja LCA	71

7. Koszt cyklu życia – LCC.....	74
8. Podsumowanie.....	77
Odniesienia	79
Lista skrótów i symboli	81
Skróty	81
Symbole	82
Partnerzy i ludzie.....	83

1. Wprowadzenie

Niniejszy dokument przedstawia strukturę i wyniki projektu InnoWEE (program badań i innowacji „Horyzont 2020”, Call EeB-04-2016, Umowa Grantowa nr 723916), a także przegląd głównych etapów i osiągnięć.

1.1. Konsorcjum

InnoWEE to projekt badawczo-innowacyjny finansowany przez Komisję Europejską i realizowany przez dziesięciu partnerów reprezentujących instytuty badawcze, małe i średnie przedsiębiorstwa, firmy przemysłowe i gminy z sześciu państw członkowskich Unii Europejskiej (Ryc. 1).



PARTNERS	
	COORDINATOR CNR-ISAC, Italy CNR-ITC, Italy CNR-ICMATE, Italy
	Advanced Management Solutions, Greece
	R.E.D SRL., Italy
	Tecnalia Research & Innovation, Spain
	Guidolin Giuseppe – Eco. G. srl, Italy
	S.C Pietre Edil S.R.L, Romania
	IZNAB Sp. z o.o. "Innovation Oriented To Business" IZNAB Spółka z Ograniczoną Odpowiedzialnością, Poland
	Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, Slovenia
	Magnetti Building SpA, Italy
	Municipality Varis-Voulas- Vouliagmenis, Greece

Ryc. 1. Partnerzy w konsorcjum InnoWEE

1.2. Zarys projektu

W Unii Europejskiej całkowita ilość odpadów wynosi około 2,5 miliarda ton (2016, UE-28), przy czym sektor budowlany stanowi ponad jedną trzecią całości. W rzeczywistości odpady inne niż niebezpieczne z budowy i rozbiórki (CDW) stanowią ogromny strumień (około 335 mln ton w 2016r.), który ma znaczny potencjał recyklingu, chociaż znaczna część jest nadal składowana na wysypiskach lub wykorzystywana w miejscach o niskiej wartości dodanej, np. zasypywanie dróg i fundamentów.

Ponadto budynki stanowią około 40% całkowitego zużycia energii w Unii Europejskiej i są uważane za strategiczne w ramach polityk UE na rzecz poprawy bezpieczeństwa energetycznego, konkurencyjności i zrównoważonego rozwoju Europy.

W tych ramach oraz zgodnie z podejściem gospodarki o obiegu zamkniętym do zrównoważonego rozwoju, projekt InnoWEE miał na celu opracowanie prefabrykowanych paneli architektonicznych, dla poprawy efektywności energetycznej budynków, wykonanych z innowacyjnych spoiw geopolimerowych zawierających duże ilości kruszyw pochodzących z recyklingu CDW (Ryc. 3). Panele te zostały zaprojektowane z myślą o niskim wpływie na środowisko, niskiej energii, niskiej emisji CO₂ i wysokiej wydajności cieplnej. Docelowe instalacje obejmują również istniejące budynki, ze szczególnym uwzględnieniem tych należących do dziedzictwa kulturowego.

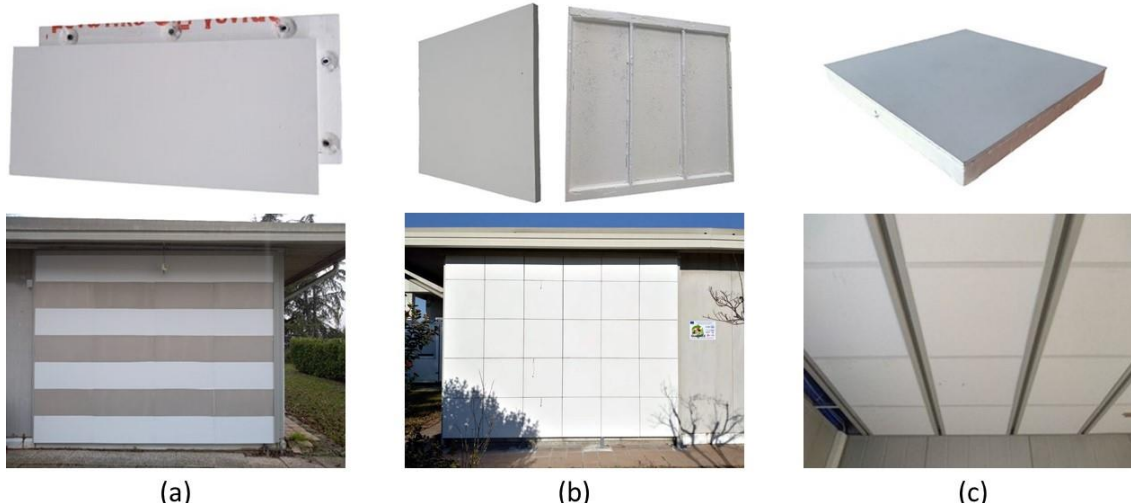
Geopolimery to spoiwa nieorganiczne, które są ogólnie uważane za bardziej ekologiczne niż materiały na bazie cementu portlandzkiego, ze względu na ich niższy ślad węglowy i możliwość zastosowania różnych odpadów lub surowców wtórnych (SRM) jako odczynników. W ramach InnoWEE opracowano dwa materiały geopolimerowe, tj. płynną zaprawę zawierającą 50% masy odzyskanych kruszyw nieorganicznych, która jest głównym składnikiem paneli, oraz geopolimerową płytę wiórową z drewna zawierającą 40% lub 50% masy odzyskanych kruszyw drewnianych. Część badań poświęcona była ocenie możliwych metod przetwarzania CDW w celu uzyskania odpowiednich kruszyw z recyklingu.

Opracowano trzy rodzaje prefabrykowanych paneli modułowych (Ryc. 2), dwa do zastosowań zewnętrznych:

- panele kompozytowe z zewnętrzną izolacją termiczną (ETICS);
- wentylowane panele elewacyjne;

i jeden do wewnętrznych systemów ogrzewania i chłodzenia:

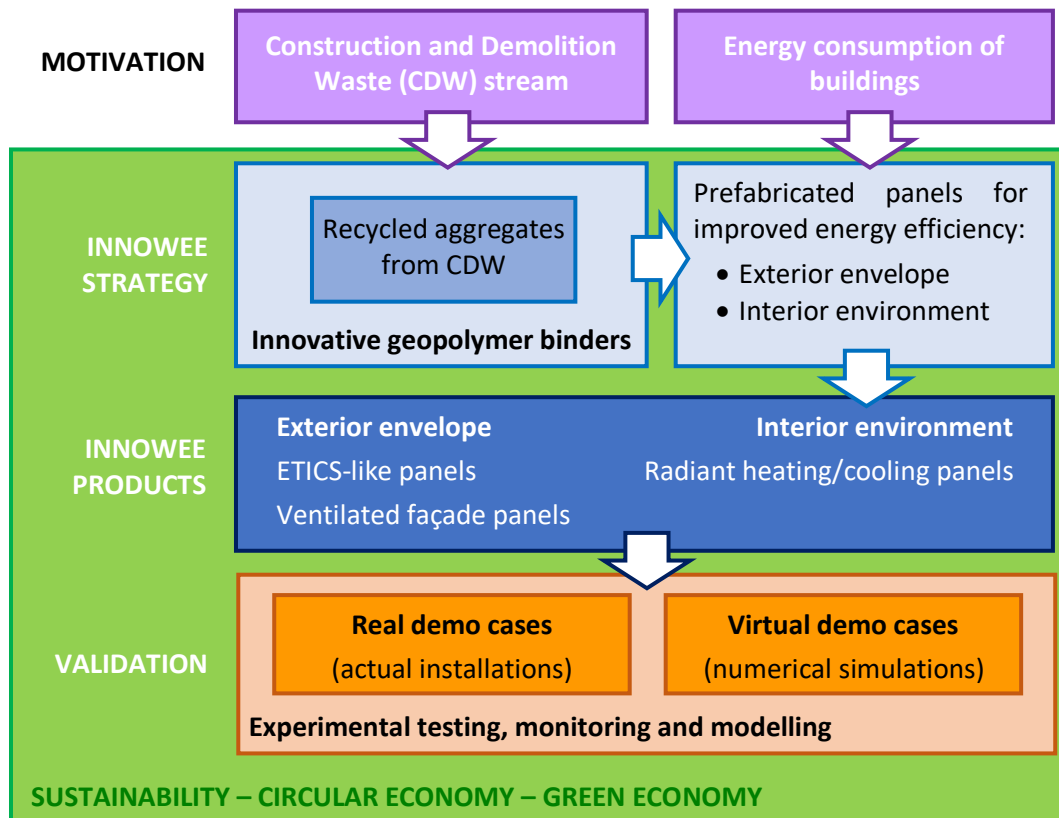
- promiennikowe panele sufitowe do ogrzewania / chłodzenia (opracowane również w dodatkowej wersji, zmodyfikowane do pionowego montażu na ścianie, które zostało przetestowane tylko w laboratorium).



Ryc. 2. Panele InnoWEE wraz z instalacją w domu pilotażowym w Padwie (Włochy): (a) ETICS, (b) wentylowana fasada i (c) promienne panele sufitowe

Opracowano, zaprojektowano i zainstalowano linię pilotażowego zwiększania skali technologii (TUPP), aby umożliwić produkcję około 400 elementów, w tym prób do dostosowania zwiększonej produkcji, panele do testowania wydajności i trwałości oraz właściwe panele do zainstalowania w prawdziwych budynkach demonstracyjnych.

Wytworzone panele zastosowano w czterech rzeczywistych budynkach demonstracyjnych, aby ocenić metody instalacji i ich parametry pod względem wydajności cieplnej i trwałości. Ponadto zostały sprawdzone w czterech wirtualnych budynkach demonstracyjnych za pomocą symulacji numerycznych.



Ryc. 3. InnoWEE „w pigułce”

Działania projektu InnoWEE są realizowane z uwzględnieniem konkretnych celów.



Opracować realistyczne i wydajne rozwiązania z innowacyjnymi produktami dla nowych i istniejących budynków.



Odzyskiwanie, demontaż i selekcja CDW w celu uzyskania odpowiednich surowców wtórnych i opracowanie nowych, wysokowydajnych, prefabrykowanych uniwersalnych paneli geopolimerowych.



Aby zweryfikować wydajność paneli instalując je najpierw w pilotażu, a następnie w 3 realnych budynkach demonstracyjnych. Modelowanie prawdziwych i „wirtualnych” obiektów demonstracyjnych o innym klimacie w celu uzyskania różnych scenariuszy.



Wprowadzenie nowych materiałów budowlanych i rozwiązań na rynkach nowych i istniejących budynków, tworząc tym samym nowe możliwości rozwoju biznesu i nieruchomości.



Opracowanie wytycznych informacyjnych dotyczących instalacji i szkolenia na temat nowych rozwiązań i rozpowszechniania wyników.

1.3. Etapy InnoWEE

Projekt InnoWEE został zaplanowany według następujących etapów:

1. W pierwszej fazie projektu przeprowadzono identyfikację odpowiednich nieorganicznych i drewnianych CDW aby opracować i ocenić zadowalające przetwarzania odpadów w celu uzyskania odpowiednich kruszyw poddanych recyklingowi, przekształcając w ten sposób CDW w surowce wtórne (SRM). Faza ta obejmowała modernizację istniejącej instalacji do obróbki CDW przeznaczonej do zasypywania dróg, która została zmodyfikowana w celu uzyskania piasków z recyklingu o wielkości cząstek ≤ 2 mm.
2. Następnie opracowano dwa spoiwa geopolimerowe, jeden z agregatami nieorganicznymi (geopolimer o wysokiej gęstości – HDG), a drugi z agregatami drewna (geopolimer drzewny – WG). Ten pierwszy był głównym składnikiem wszystkich paneli (z wyłączeniem możliwej izolacji), natomiast drugi, w postaci cienkiej warstwy, został nałożony na tylną część wentylowanych elementów elewacji i został zastosowany w zmodyfikowanej wersji ściennych paneli promieniujących. Optymalizacja spoiw obejmowała dostosowanie właściwości technologicznych surowych materiałów do wymagań zakładu pilotażowego oraz szeroko zakrojone badania właściwości mechanicznych/fizycznych utwardzonych materiałów w celu dostarczenia prototypów paneli o zadowalającej jakości.
3. Faza prototypowania, częściowo pokrywająca się z rozwojem spoiw i instalacji pilotażowej, została poświęcona identyfikacji głównych cech paneli pod względem rozmiarów, kształtu itp., oraz wstępnemu przetestowaniu ich wydajności, a także w celu zapewnienia niezbędnych wskazówek dla projektu instalacji pilotażowej. Wstępny test montażu paneli zewnętrznych przeprowadzono na izolowanej ścianie żelbetowej w obiektach CNR.
4. Po uzyskaniu pozytywnych wyników w laboratorium, AMS w Grecji przeprowadził pilotażową produkcję paneli InnoWEE w specjalnie zmodyfikowanej instalacji pilotażowej up-scalingu technologii (TUPP). Drewniane panele geopolimerowe (WGP) zostały wyprodukowane w obiektach CNR we Włoszech. Faza ta obejmowała ocenę metod produkcji zgodnie z podejściem przemysłowego zarządzania jakością. Wyprodukowano około 400 elementów, w tym do montażu w budynkach demonstracyjnych oraz do testów wydajności i trwałości.
5. Panele zainstalowano w 4 rzeczywistych budynkach demonstracyjnych, dokładnie monitorowanych przed i po instalacji w celu oceny wydajności cieplnej w rzeczywistych warunkach. Obserwowano również trwałość. Wyniki monitorowania wykorzystano w symulacjach przeprowadzonych na wirtualnym budynku demonstracyjnym, aby zweryfikować wpływ i skuteczność interwencji.
6. Na koniec przeprowadzono analizę cyklu życia (LCA) w celu oceny wpływu wszystkich proponowanych rozwiązań na środowisko. Działania zostały ostatecznie zakończone analizą kosztów cyklu życia (LCCA) oraz opracowaniem przemysłowego i biznesplanu w celu określenia potencjału rynkowego.

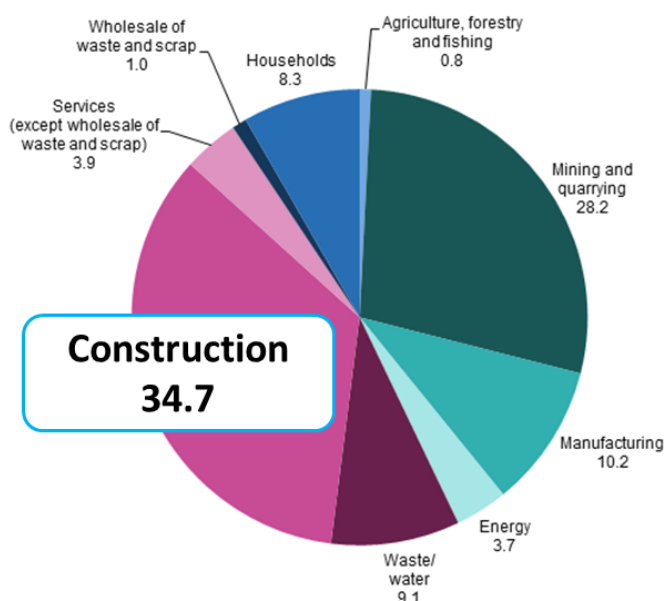
2. Opracowanie nowych materiałów i paneli

W tej części przedstawiono badania przeprowadzone w celu: (i) identyfikacji i przetwarzania odpadów budowlanych i rozbiórkowych (CDW) w celu uzyskania kruszyw z recyklingu odpowiednich do materiałów geopolimerowych, które są głównym składnikiem paneli InnoWEE; (ii) opracowania spoiw geopolimerowych, odpowiadających wymaganiom zakładu pilotażowego i mogących dostarczyć panele o zadowalającej jakości; (iii) zaprojektowania i dostrojenia cech paneli oraz metod odlewania/utwardzania.

2.1. Przetwarzanie i wykorzystanie odpadów

Odpady budowlane i rozbiórkowe (CDW)

Materiał geopolimerowy zastosowany do produkcji paneli InnoWEE zawiera 50% suchej masy nieorganicznych kruszyw pochodzących z recyklingu CDW. CDW zazwyczaj zawierają obojętne materiały mineralne (beton, cegły, płytki i ceramikę itp.), podczas gdy mogą występować mniejsze ilości innych składników (np. drewna, szkła, płyt gipsowo-kartonowych, mieszanek bitumicznych i smoły). CDW stanowią około jednej trzeciej wszystkich odpadów wytwarzanych w UE (Ryc. 4), co stanowi około 0,8-1 miliarda ton rocznie.



Ryc. 4. Odpady budowlane wśród wszystkich odpadów wytwarzanych w UE (Eurostat).

Podczas pracy z odpadami i ich przetwarzaniem na nowe produkty należy wziąć pod uwagę różne dokumenty legislacyjne. W przypadku InnoWEE, w którym mamy do czynienia z CDW i przetwarzamy je na produkty budowlane, należy uwzględnić co najmniej następujące dokumenty:

- ustawodawstwo dotyczące odpadów;
- ustawodawstwo dotyczące nowych produktów (budowlanych) (sekcja **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**).

Prawodawstwo UE dotyczące odpadów i przekształcania odpadów w surowce wtórne (SRM)

Istnieje szczegółowa lista dokumentów, określająca aktualne przetwarzanie odpadów i procedury uzyskiwania surowców wtórnych.

Ogólne przepisy dotyczące odpadów

- Dyrektywa ramowa w sprawie odpadów 2008/98/EC;
- Europejski wykaz odpadów (COM 2000/532/EC);
- Decyzja Komisji 2011/753/UE;
- Rozporządzenie w sprawie przemieszczania odpadów 1013/2006/EC;
- Dyrektywa w sprawie składowania odpadów 1999/31/EC;
- Akceptacja decyzji 2003/33/EC w sprawie składowisk odpadów;
- Rozporządzenie w sprawie zanieczyszczeń organicznych nr 850/2004.

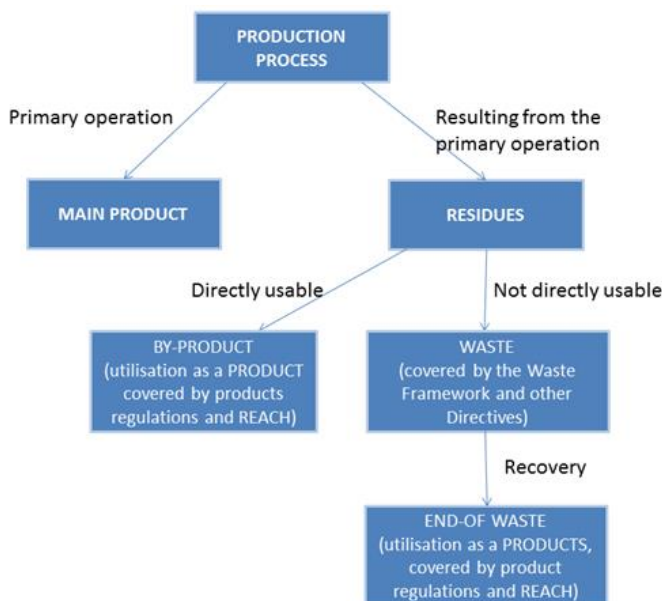
Ogólne przepisy dotyczące materiałów

- Rozporządzenie w sprawie wyrobów budowlanych 305/2001;
- Rozporządzenie REACH 1907/2006;
- Rozporządzenie CLP nr 1272/2008.

Na przykład produkcja pozostałości jest nieuniknioną konsekwencją podstawowej operacji. Chociaż nie są one głównym komercyjnym produktem procesu, pozostałości mogą mieć wartość na wiele innych sposobów i, jak pokazano na Ryc. 5, są stosowane natychmiast lub, w dłuższej perspektywie, po odzysku. W pierwszym przypadku pozostałości należy traktować jako produkty uboczne, ale nigdy jako odpady; w tym ostatnim przypadku po odzyskaniu pozostałości powinny przestać być odpadami i stać się produktami w miejscu odzysku.

Wydajność wyrobów budowlanych, w tym produktów z materiałów pochodzących z recyklingu, objęta jest CPR – Rozporządzeniem w sprawie wyrobów budowlanych (CPR (UE) nr 305/2011).

Odpady przestają być odpadami po przetworzeniu na produkty i po spełnieniu szeregu określonych kryteriów. Wymagania techniczne dotyczące wykorzystania CDW do celów budowlanych są uregulowane w CPR.



Ryc. 5. Cykl życia produktu



Ryc. 6. Różnica w stosowanych przepisach w zależności od odpadów lub produktu

Tabela 1. Klasyfikacja odpadów używanych w InnoWEE zgodnie z Europejskim wykazem odpadów

Typ odpadu zgodnie z Europejskim wykazem odpadów	Status odpadu	Kod odpadu
Beton	Nie niebezpieczny	17-01-01
Cegły	Nie niebezpieczny	17-01-02
Mieszanka betonu, cegieł, płytek i ceramiki	Nie niebezpieczny	17-01-07
Drewno – nieobrobione	Nie niebezpieczny	17-02-01
Szkło – niezanieczyszczone	Nie niebezpieczny	17-02-02

Identyfikacja odpadów, segregacja i zbieranie odpadów

UE przyznaje, że „ulepszona zbiórka towarów do ponownego użycia i recyklingu wymaga selektywnego wyburzenia i odpowiednich działań na miejscu”. Protokół zarządzania odpadami (2016) ma na celu zwiększenie „zaufania do procesu gospodarowania odpadami z budowy i rozbiórki (C&D)” oraz „zaufania do jakości materiałów pochodzących z recyklingu C&D”.

Istnieją cztery główne kroki, aby osiągnąć cel racjonalnego zarządzania CDW w celu uzyskania cennego SRM:

1. Audyty przed rozbiórką – Wszystkie materiały, które mają zostać wygenerowane, muszą zostać zidentyfikowane, a ich ilości oszacowane. Należy zrozumieć, co należy wyodrębnić u źródła (np. odpady niebezpieczne), co można wykorzystać/podać recyklingowi i jak gospodarować odpadami. Audyt przed rozbiórką należy przeprowadzić przed każdym projektem renowacji lub rozbiórki, a także w celu ponownego wykorzystania lub recyklingu każdego materiału, a także odpadów niebezpiecznych, w celu „zidentyfikowania wytworzonych odpadów budowlanych i rozbiórkowych, wdrożenia właściwej dekonstrukcji i określenia demontażu i praktyki rozbiórki”.



Ryc. 7. Przykład budynku do selektywnej rozbiórki

2. Plan gospodarki odpadami – Plan musi uwzględniać, w jaki sposób zostaną wykonane poszczególne etapy rozbiórki i przez kogo. Powinien wskazywać, które materiały będą selektywnie zbierane u źródła, w jaki sposób będą transportowane, ale także co zostanie poddane recyklingowi, ponownie wykorzystane lub ostatecznie przetworzone oraz w jaki sposób należy postępować zgodnie z każdą procedurą. Powinien także wyjaśnić, jak rozwiązać problemy związane z bezpieczeństwem i ograniczyć wpływ na środowisko.

3. Selektywne wyburzenie – Zgodnie ze wspomnianym protokołem zarządzania CDW UE procedura powinna wyglądać następująco:

- a) segregacja odpadów niebezpiecznych;
- b) dekonstrukcja (demontaż, w tym oddzielenie strumieni bocznych i materiałów mocujących);
- c) oddzielenie materiałów mocujących;
- d) wyburzenie strukturalne lub mechaniczne.

Demontaż powinien obejmować szeroki zakres materiałów, np. szkło, ramy okienne, elementy marmurowe, cenne gatunki drewna, wyroby sanitarne, grzejniki, elementy metalowe, pianka izolacyjna itp. Poprawia to zarówno oczyszczanie strumieni odpadów, jak i możliwość ponownego użycia. Strumienie odpadów (np. beton, cegły, mur, płytki, ceramika itp.) należy przechowywać oddzielnie.



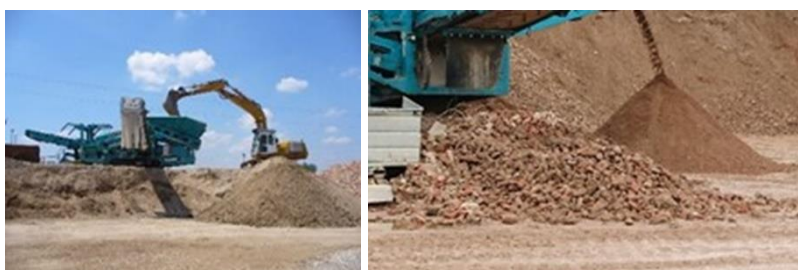
Ryc. 8. Obrazy z placów budowy z trwającymi selektywnymi wyburzeniami

4. Przetwarzanie i obróbka – Jak podkreślono w protokole, „przestrzeganie hierarchii postępowania z odpadami oferuje szerokie korzyści pod względem wydajności zasobów, trwałości i oszczędności kosztów”. W miarę możliwości przygotowanie do ponownego użycia jest preferowaną opcją, ponieważ wymaga niewielkiego przetworzenia lub nie wymaga go wcale, dlatego nie występują oddziaływania na środowisko związane z ponownym przetwarzaniem. Z drugiej strony, utylizacja na składowiskach powinna być na ogół ostatnim rozwiązaniem do wyboru. Istnieje wiele opcji, zgodnie z hierarchią postępowania z odpadami:

- a) przygotowanie do ponownego użycia;
- b) recykling;
- c) odzysk materiałów;
- d) odzysk energii;
- e) inne odzyskiwanie;
- f) składowanie.

Przetwarzanie CDW w celu uzyskania surowców wtórnych InnoWEE

Gdy wybrane CDW są transportowane do zakładu przetwórczego, najpierw przeprowadzana jest kontrola wizualna w celu usunięcia niepożądanych pozostałości (plastiku, części drewnianych itp.). Pozostałe odpady są mieszane razem, grubsze części są kruszone i przechowywane wokół nasypu (Ryc. 9). Następnie materiały są podawane na ekran. Pierwszy separator magnetyczny znajduje się w korespondencji z ekranem w celu zbierania ewentualnych skrawków metalu. Większa frakcja zasila kruszarkę szczękową, a po zmniejszeniu wielkości przeprowadza się drugą separację magnetyczną. Przetworzony materiał jest przechowywany w oczekiwaniu na wymaganą weryfikację, a następnie wprowadzany do obrotu.



Ryc. 9 Pierwszy etap przetwarzania CDW – kruszenie i separacja magnetyczna

Z procesu kruszenia i przesiewania otrzymuje się trzy wielkości frakcji: większe niż 60 mm, mniejsze niż 30 mm i między 30–60 mm. Frakcja 30–60 mm została wybrana do produkcji SRM InnoWEE ze względu na ogólnie niską zawartość gleby, substancji organicznych itp. Frakcja ta jest podawana do drugiego młyna młotkowego, który operuje wymaganą redukcją objętości (Ryc. 10). Konieczne były

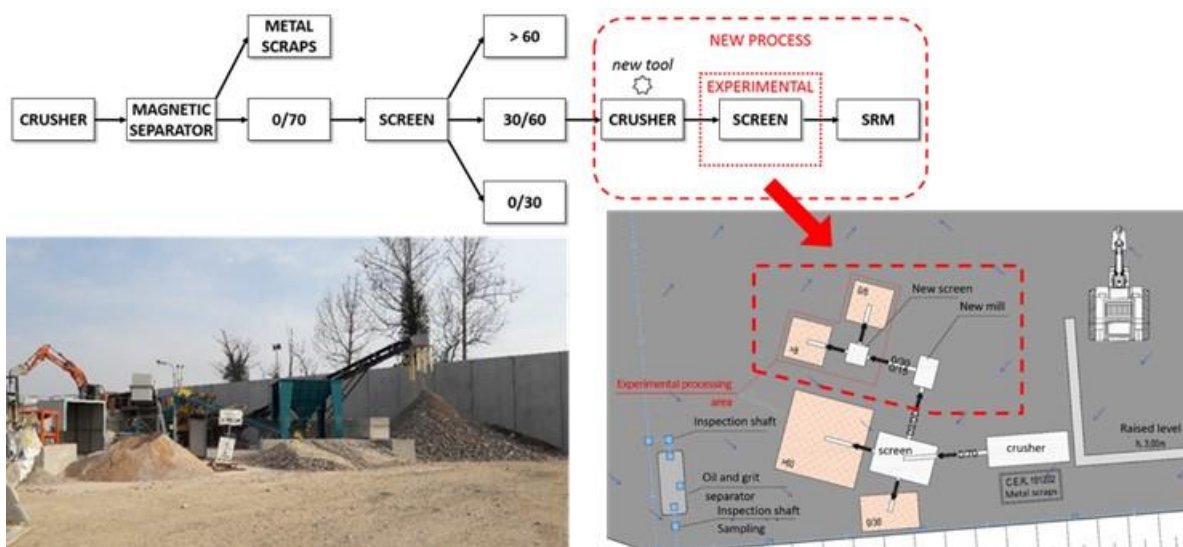
dalsze udoskonalenia za pomocą dodatkowego sita, aby osiągnąć pożądany zakres wymiarów (≤ 2 mm).



Ryc. 10. Kruszywa mniejsze niż 2 mm otrzymane z przetwarzania CDW

Aby spełnić wymagania środowiskowe określone w zezwoleniu wydanym przez włoskie władze lokalne w celu umożliwienia modernizacji zakładu, przeprowadzono następujące ulepszenia (Ryc. 11):

- **bariera dźwiękochłonna** w pobliżu obszaru przetwarzania;
- **nowy system nawierzchni i uzdatniania wody** w celu zapewnienia zgodności z lokalnym planem ochrony wód;
- **dotychczasowy system redukcji pyłu**.



Ryc. 11. Zakład przetwórstwa CDW

Kryteria końca odpadu (EoW)

Aby spełnić kryteria EoW określone przez włoskie władze lokalne, uzyskane surowce wtórne są analizowane w laboratorium w celu sprawdzenia, czy spełniają one określone wymagania fizyczne i chemiczne. Testy przeprowadza się zgodnie ze szczegółowymi procedurami opisanymi w normach, jak pokazano w Tabela 2.

Tabela 2. Procedury stosowane do analizy różnych właściwości kruszyw

CDW	ANALIZA	PROCEDURA
Kruszywo (beton, cegła, szkło)	Morfologia, typ i kształt kruszywa	Mikroskopia
	Analiza elementarna	XRF
	Identyfikacja fazy mineralnej	XRD

	Powierzchnia właściwa	Powierzchnia
	Rozpuszczanie w środowisku alkalicznym (reaktywność geopolimerowa)	Stężenie Si, Al w roztworze alkalicznym przez ICP MS
	Oznaczanie ilościowe węgla	EN 12620, EN 196-2
	Analiza sitowa (próba)	Sita (opcjonalna granulometria laserowa dla drobnej frakcji)
	Absorpcja wody	EN 12620, EN 1097-6
	Gęstość i luźna gęstość nasypowa	EN 1097-3
	Wytrzymałość na ściskanie	EN 1097-11
	Metale ciężkie	Test wymywania
	Chlorki	EN 1744-1, EN 1744-5
	Siarczany	EN 1744-1
	Różne związki organiczne (TOC, PCB, PAH)	

2.2. Opracowanie geopolimerów InnoWEE

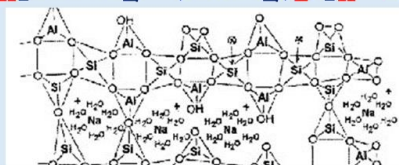
Geopolimery to nieorganiczne polimery otrzymane w reakcji proszku glinokrzemianu z wodnym roztworem alkalicznym (Ryc. 12). Należą one do szerszej klasy chemicznie aktywowanej ceramiki, dokładnie badanej przez Davidovitsa i innych badaczy.

R = ions (K^+ , Na^+ , ...)

n = degree of policondensation

w = bound water

z = 1,2,3...related to the network (< 3 for 3D network)



Ryc. 12. Chemiczna struktura geopolimerów

Ich ślad węglowy jest ogólnie uważany za znacznie niższy niż ślad cementu portlandzkiego. Zastosowanie odpadów budowlanych i rozbiórkowych (CDW) w materiałach aktywowanych alkaliem (AAM) i spoiwach geopolimerowych, jako obojętnych kruszyw lub materiałów częściowo reaktywnych, zostało zbadane w ostatnich latach z pozytywnymi wynikami. AAM/geopolimery wykazały niezwykłą elastyczność w stosowaniu wielu rodzajów różnych odpadów przemysłowych i produktów ubocznych, a także wydają się oferować obiecującą alternatywną opcję recyklingu CDW. Ponadto wykazują one ogólnie doskonałe zachowanie wobec wysokich temperatur.

Składniki spoiwa geopolimerowego InnoWEE

Materiał geopolimerowy użyty do produkcji paneli InnoWEE zawiera 50% suchej masy nieorganicznych kruszyw pochodzących z recyklingu pochodzących z odpadów budowlanych i rozbiórkowych (CDW) lub 40-50% kruszyw organicznych odpadów drzewnych. Spoiwo geopolimerowe o wysokiej gęstości (HDG) opracowane w ramach InnoWEE, które jest głównym składnikiem paneli, oparte jest na typowych odczynnikach, tj. metakaolinie, mielonym żużlu z pieca granulowanego, popiele lotnym, krzemianie potasu lub sodu, a na koniec nieorganicznych agregaty pochodzące z CDW. Te składniki, zmieszane razem (np. za pomocą mieszarki planetarnej lub betoniarki) w odpowiednich proporcjach, wytworzą materiał, który można utwardzić w temperaturze otoczenia i po stwardnieniu będzie podobny do zwykłej zaprawy lub betonu, w zależności od wielkości agregatu (Ryc. 13).



Metakaolin. Materiał puzzolanowy pochodzący z kalcynacji kaolinitu (tj. glinki chińskiej), miękkiego minerału ilastego ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), stosowanego głównie jako dodatek do betonu. Minerał ogrzewa się w temperaturze 600–800°C, a następnie miele.



Żużel z pieca. Zmielone granulowane żużle wielkopiecowe są szklistym produktem ubocznym uzyskiwanym podczas produkcji metali z rudy i koksu, ogólnie bogatych w CaO , SiO_2 i Al_2O_3 . Są one szybko schładzane poniżej 800°C, aby poprawić ich reaktywność i hydrauliczność, do stosowania jako dodatek do betonów.



Popiół lotny. Produkt spalania węgla wychwycony w elektrowniach węglowych, stosowany jako dodatek puzzolanowy lub częściowe zastąpienie cementu portlandzkiego w betonie. Składa się głównie z kulistych cząstek między 0,5 a 300 μm , z różnymi składnikami (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ...). Popioły lotne klasy F zawierają mniej niż 7% CaO .



Alkaliczne roztwory krzemianów. Zazwyczaj wytwarza się je z piasku kwarcowego, węglanów alkalicznych, takich jak soda kalcynowana (Na_2CO_3) lub potażu (K_2CO_3), wodorotlenków alkalicznych (np. NaOH , KOH), wody i paliw. Mają wiele zastosowań, od konstrukcji (np. w powłokach do betonu i kamieniarskich) po kilka zastosowań przemysłowych.



Kruszywa z recyklingu (SRM). Odpady nieorganiczne pochodzące z selektywnej rozbiórki zwykłych budynków, przetwarzane w celu uzyskania odpowiednich kruszyw z recyklingu.



Ryc. 13. Składniki nieorganicznych mieszanin HDG

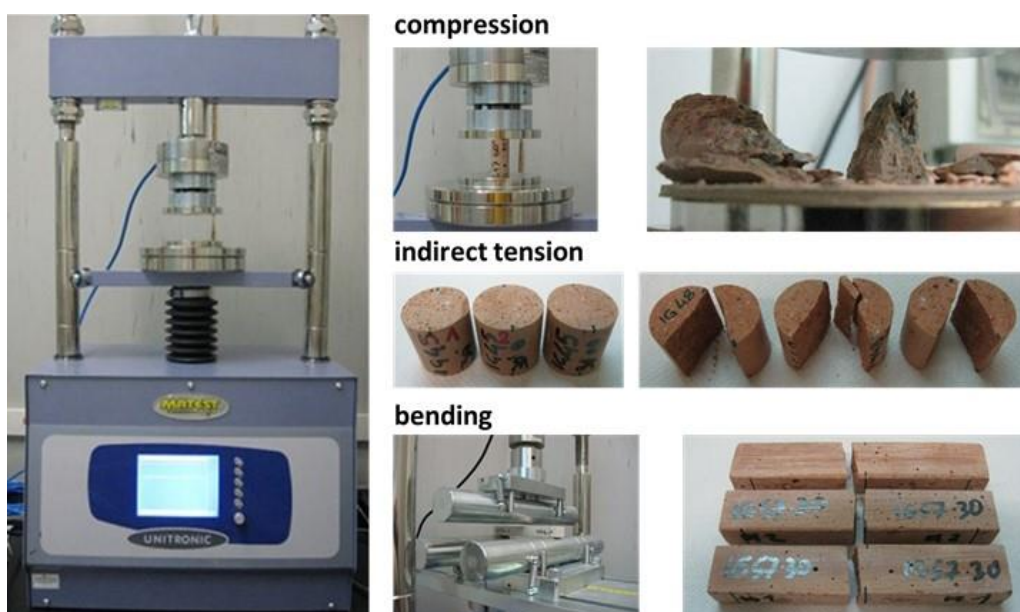
Kruszywa zostały uznane za prawie obojętne materiały, tj. zakłada się, że nie biorą udziału w reakcji geopolimerowej. Odpady nieorganiczne obejmują beton, zaprawę i wypalane cegły gliniane, płytki i inne niebezpieczne odpady pochodzące z selektywnej rozbiórki zwykłych budynków.

Optymalizacja spoiwa

Cechy najbardziej obiecujących preparatów testowych przetestowano w prototypach paneli, aby wskazać możliwe problemy niewidoczne z próbek materiału. Optymalizacja spoiwa była złożonym zadaniem, które obejmowało jednocześnie osiągnięcie:

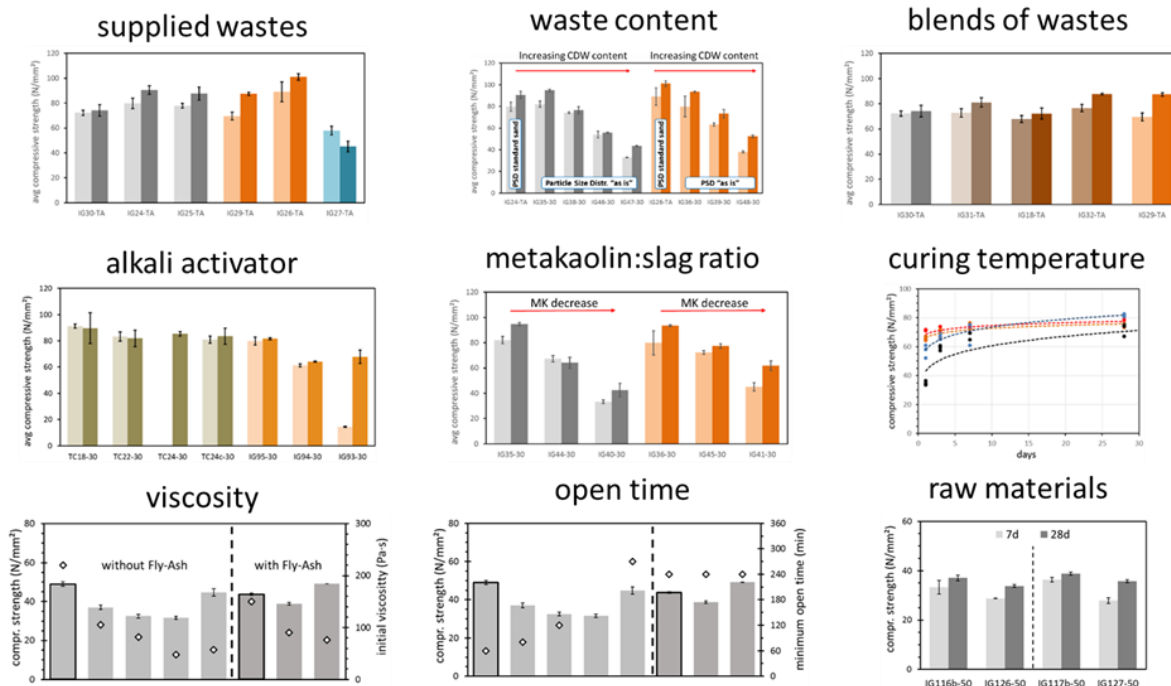
- właściwości technologicznych świeżej pasty odpowiednie dla dostępnej instalacji pilotażowej (pod względem lepkości, czasu wiązania itp.);
- właściwości mechanicznych utwardzonego materiału (mierzone poprzez ściskanie, rozłupywanie i zginanie) adekwatne do jakości paneli;
- właściwości fizycznych (np. skurcz przy suszeniu) w połączeniu z wydajnością mechaniczną, odpowiednie do zapobiegania większości wad paneli, takich jak zniekształcenie kształtu, pękanie itp.

Zadanie zostało przeprowadzone heurystycznie, łącząc obszerne testy eksperymentalne na próbkach materiałów (Ryc. 14) i prototypach paneli w skali rzeczywistej.



Ryc. 14. Właściwości testowe: wytrzymałość mechaniczna (kompresja, napięcie pośrednie, zginanie)

Aby znaleźć najbardziej obiecujące preparaty, a następnie dostroić je, aby uzyskać najbardziej odpowiednią recepturę, zbadano wiele parametrów. Oznacza to, że do wytworzenia zastosowano wiele odmian. Wytrzymałość na ściskanie była jednym z głównych wskaźników, które stanowiły podstawę decyzji, ale systematycznie mierzono również kilka innych właściwości, np. pośrednia wytrzymałość na rozciąganie; skurcz przy suszeniu; gęstość materiału i porowatość otwarta; lepkość i czas wiązania (ten ostatni w fazach zaawansowanych).



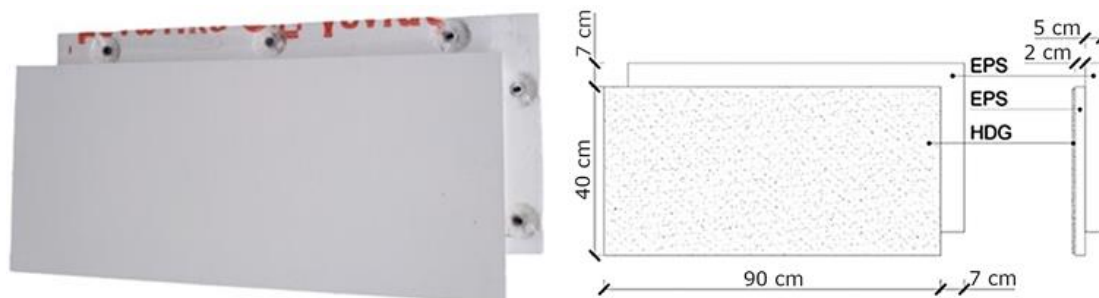
Ryc. 15. Przykłady zbadanych parametrów dla HDG

Jako przykład (Ryc. 15) możemy wymienić niektóre z badanych parametrów: rodzaj materiałów odpadowych, ich ilość i mieszanki; temperatury utwardzania, rodzaj i ilość aktywatora alkalicznego; stosunek metakaolin/żużel; ilość popiołu lotnego; rozkłady wielkości cząstek poddanych recyklingowi agregatów.

2.3. Opracowanie paneli

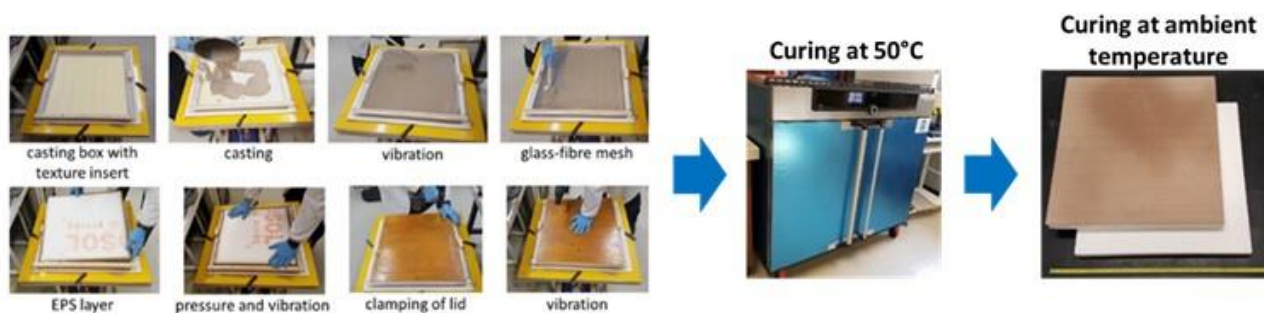
Panele ETICS-podobne

Panele ETICS-podobne InnoWEE (Ryc. 16) mają szerokość 40 cm x 90 cm i zostały opracowane jako modułowe prefabrykowane rozwiązanie do izolacji zewnętrznej. Panele są stosunkowo lekkie (6,5 kg/panel, ok. 18 kg/m²) i składają się z płyty o grubości 8 mm z geopolimeru o wysokiej gęstości (HDG), która pokrywa warstwę izolacyjną z EPS 20 + 50 mm grubości. Warstwa HDG zawiera 50% masy kruszyw z odpadów budowlanych i rozbiórkowych (CDW) z mieszanych odpadów nieorganicznych (kruszony beton, wypalane cegły gliniane itp.). Panele mogą być potencjalnie produkowane z różnymi teksturami powierzchni, a ich powierzchnia jest chroniona przezroczystą lub kolorową farbą.



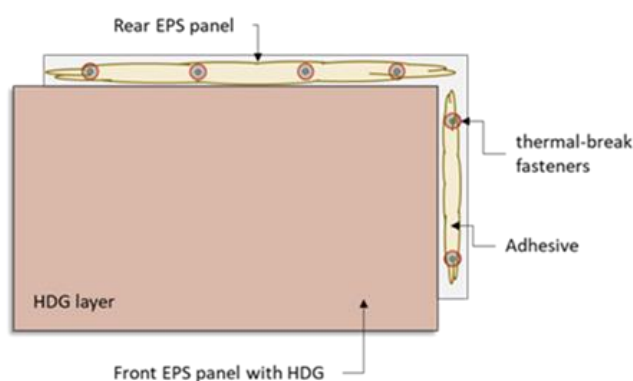
Ryc. 16. Ostateczny wygląd i funkcje paneli ETICS-podobnych

Wytwarzanie części HDG odbywa się w procesie polegającym na bezpośrednim odlewie na płycie izolacyjnej. Aby zwiększyć bezpieczeństwo, w warstwie HDG umieszcza się siatkę z włókna szklanego.



Ryc. 17. Produkcja laboratoryjna prototypowych paneli typu ETICS

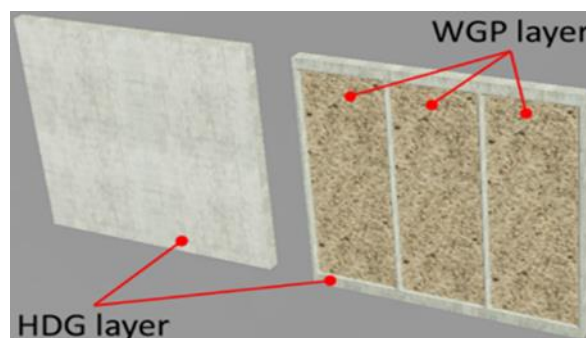
Panele ETICS-podobne są przyklejane do powierzchni ściany za pomocą zwykłych klejów i mocowane za pomocą dostępnych na rynku łączników termoizolacyjnych nakładanych na przesunięte krawędzie dolnej warstwy izolacyjnej. Oceniono zgodność z wymogami eurokodów dotyczącymi działań związanych z wiatrem i trzęsieniem ziemi, a także siłą wiązania między warstwami. Minimalna siła wiązania zmierzona zgodnie z ETAG-004 wynosi $0,08 \text{ N/mm}^2$.



Ryc. 18. System mocowania panelu ETICS-podobnego

Wentylowane panele elewacyjne

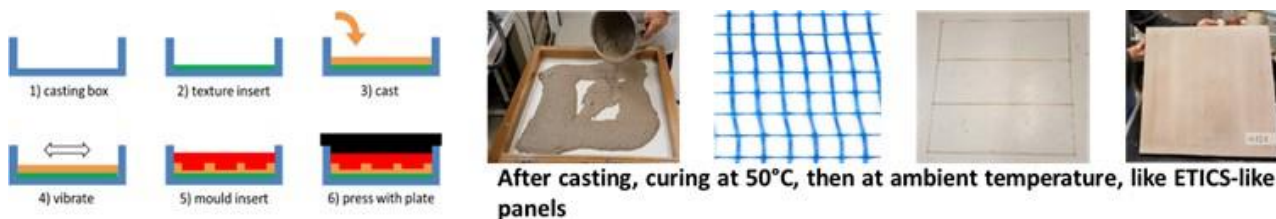
Wentylowane panele elewacyjne InnoWEE (Ryc. 19) mają szerokość $59,5 \text{ cm} \times 59,5 \text{ cm}$, co odpowiada modułowej instalacji co 60 cm . Panele są stosunkowo lekkie (9 kg/panel , ok. 25 kg/m^2), dzięki swojej konstrukcji. Składają się z płyty o grubości 8 mm z geopolimeru o wysokiej gęstości (HDG) z żebrami usztywniającymi, przymocowanej do tylnego wzmacniającego panelu geopolimerowego z drewna (WGP) o grubości 7 mm .



Ryc. 19. Wentylowane panele elewacyjne i cechy

HDG jest taki sam jak panele ETICS-podobne, natomiast WGP jest wytwarzany z 40% nieobrobionych kruszyw drewnianych z odpadów budowlanych (np. palet, płyt stolarskich itp.) związanych matrycą geopolimerową. Podobnie jak w przypadku ETICS, można zastosować różne tekstury wykończenia, a powierzchnię można zabezpieczyć przezroczystą lub kolorową farbą.

Wytwarzanie części HDG odbywa się poprzez proces odlewania przy użyciu odpowiedniej formy do kształtowania żeber usztywniających. Dla większego bezpieczeństwa w HDG osadza się siatkę z włókna szklanego i stalową linkę o ultra wysokiej wytrzymałości na rozciąganie (UHTS). W drugim etapie panel z geopolimeru drzewnego (WGP) – wytwarzany oddzielnie – przykleja się do tylnej strony panelu HDG, aby wzmocnić go przed uderzeniem.



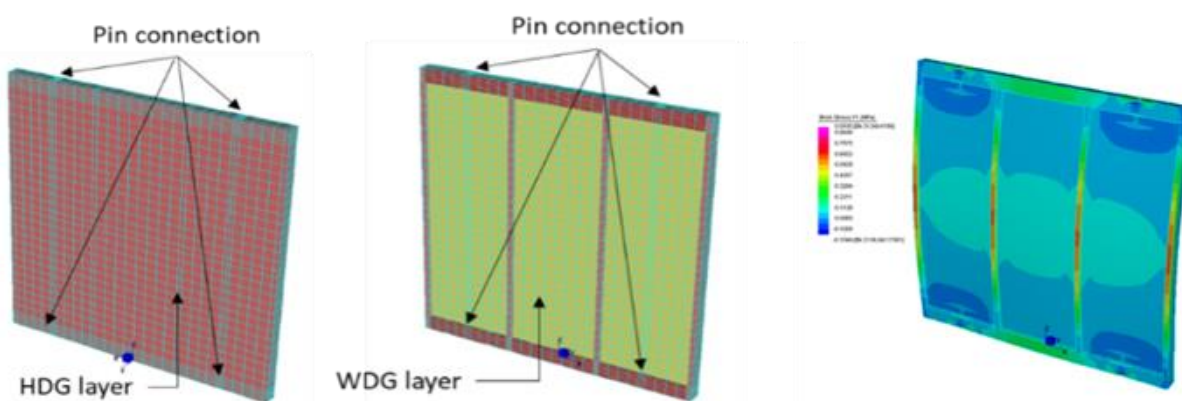
Ryc. 20. Produkcja prototypowych paneli elewacyjnych.

Panele można mocować na ramie pomocniczej lub bezpośrednio na ścianie za pomocą dostępnych na rynku kołków rozporowych. Kotwy nakłada się na panele, wykonując wiercenie otworów na ich bokach o grubości 3 cm, zarówno podczas produkcji, jak i na budowie.



Ryc. 21. System montażu

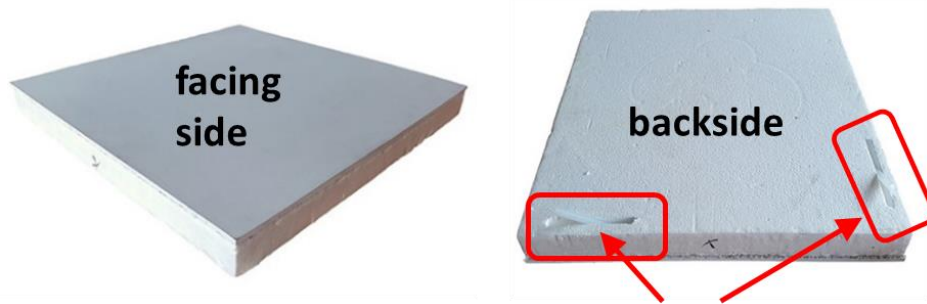
Panel został oceniony za pomocą modelowania elementów skończonych (FEM) 3D w celu sprawdzenia zgodności z działaniami projektowymi (obciążenia wywołane wiatrem i trzęsieniem ziemi), zgodnie z eurokodami. Ponadto wytrzymałość systemu mocującego typu kołkowego przetestowano eksperymentalnie zgodnie z główną zasadą standardu ASTM C135.



Ryc. 22. Ocena bezpieczeństwa obciążeń sejsmicznych i wiatrowych poprzez analizę elementów skończonych (FE)

Promienne panele sufitowe

Promienne panele sufitowe InnoWEE mają szerokość 59,5 cm × 59,5 cm, aby pasowały do popularnych modułów sufitów podwieszanych. HDG, który jest taki sam jak w ETICS-podobnych i wentylowanych panelach elewacyjnych. Waga wynosi 7,6 kg bez wody (8,1 kg z wodą). Panele mają osadzone około 6,5 m rurki PEX-a o grubości 10 mm, których kształt ma odstęp 5 cm.

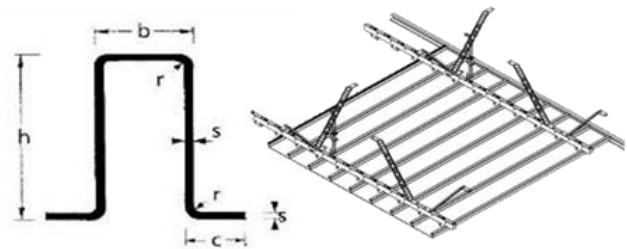


PEX-a pipe connections on backside

Ryc. 23. Promienne panele sufitowe – cechy

Panele mogą być podparte wspólnymi metalowymi profilami (Rysunek 24) stosowanymi do instalacji podwieszanych sufitów, pod warunkiem, że są oceniane pod kątem rzeczywistej masy paneli.

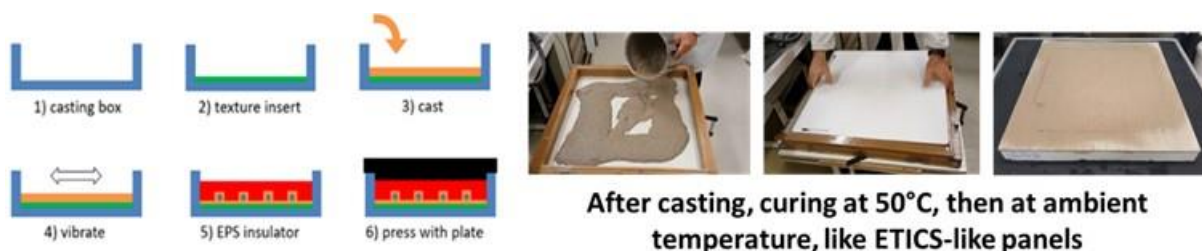
Połączenia rurowe, które znajdują się z tyłu, można wykonać za pomocą dowolnego systemu zgodnego z rurami PEX-a 10 mm. Rury są całkowicie osadzone w geopolimerze, maksymalizując transfer ciepła, a tym samym zapewniając dobry profil temperaturowy i niezwykłą wydajność cieplną, dzięki przewodności cieplnej geopolimeru ($0,77 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).



Ryc. 24. Profil montażowy

Izolacja składa się z EPS o grubości 50 mm, monolitycznie połączonego z warstwą promieniową HDG o grubości 6 mm.

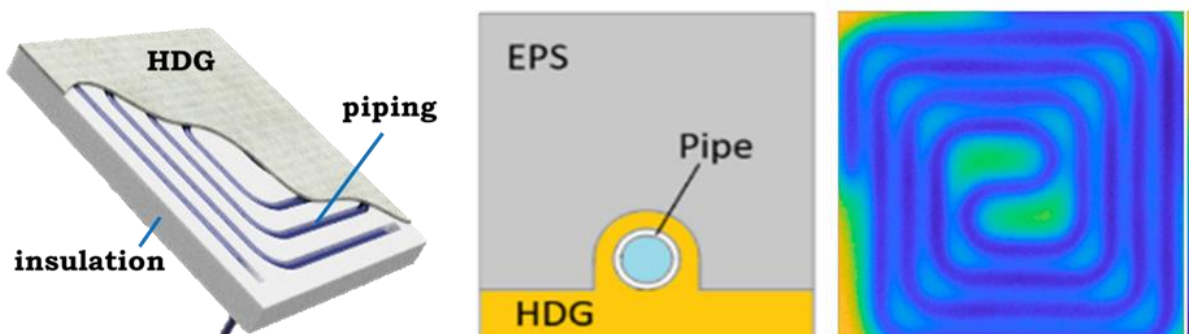
Produkcja została przeprowadzona za pomocą prostego procesu odlewania geopolimerowego, który polega na użyciu ukształtowanego panelu EPS z wstępnie zamontowaną rurą, służącego jako forma podczas odlewania. Różne tekstury powierzchni (w razie potrzeby) można łatwo uzyskać podczas odlewania.



After casting, curing at 50°C, then at ambient temperature, like ETICS-like panels

Ryc. 25. Produkcja prototypowych paneli

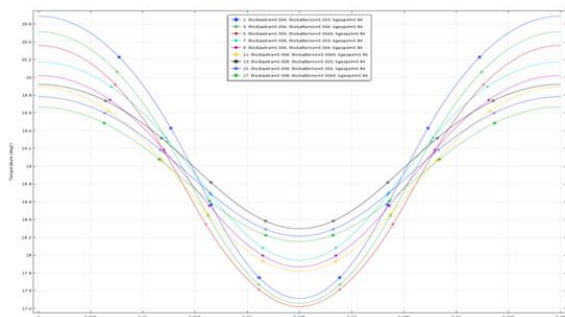
Geopolimer o wysokiej gęstości (HDG) o przewodności cieplnej $\lambda = 0,77 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ stanowi płytę wykończeniową i otacza rury, maksymalizując powierzchnię wymiany ciepła. Najlepsze funkcje, pod względem grubości HDG i odstępów między rurami, zostały również poparte symulacjami numerycznymi.



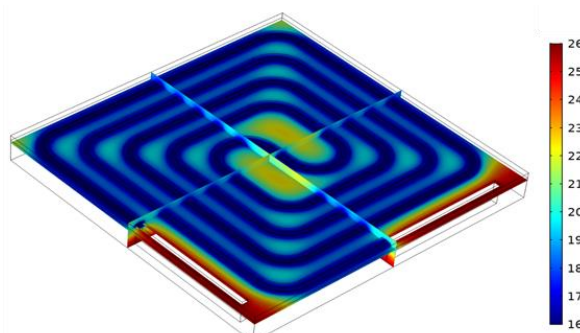
Ryc. 26. Promienne panele sufitowe - projekt

W projektowaniu zastosowano dwuwymiarowe (2D) parametryczne modelowanie elementów skończonych (FEM), które pozwoliło zoptymalizować grubość HDG, odległość od powierzchni i odstępy rur.

Ponadto trójwymiarowe (3D) symulacje FEM oceniły zachowanie, wykazując dobrą zgodność z testami eksperymentalnymi.



2D parametric simulations



Full 3D FEM simulations

Ryc. 27. Symulacje zastosowane w celu zapewnienia najlepszego projektu promiennego panelu sufitowego

Panel z geopolimeru drzewnego (WGP)

Panele z gwopolimeru drzewnego (WGP) są podobne do płyt wiórowych wiązanych cementem (CBPB). Są one wytwarzane z wiórów drzewnych, uzyskiwanych z nieobrobionego odpadowego drewna (np. palet, desek stolarskich itp.) utrzymywanych razem przez specjalnie opracowane spoiwo geopolimerowe i sprasowanie w celu uzyskania płaskiego panelu. W odróżnieniu od większości CBPB proces jest przeprowadzany w temperaturze otoczenia. Zaletą jest to, że w porównaniu do CBPB zastosowanie geopolimeru zamiast cementu portlandzkiego pozwala na szybsze wiązanie, będąc raczej niewrażliwym na uwalnianie ligniny. Ponieważ spoiwo geopolimerowe jest bardziej tolerancyjne dla różnych gatunków drewna, umożliwia stosowanie szerszego spektrum źródeł drewna. Uwzględniając reakcję na ogień, WGP jest niepalnym materiałem klasy B.



Ryc. 28. Cechy WGP



Ryc. 29. Proces produkcji WGP

2.4. Testy wydajności i trwałości w laboratorium

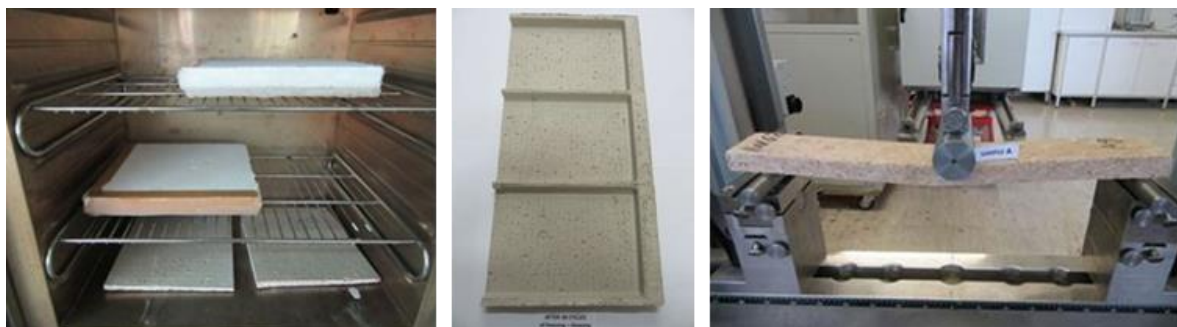
Przeprowadzono szeroko zakrojone testy w celu scharakteryzowania materiałów i paneli, w odniesieniu również do kwestii trwałości, odporności na uderzenia (ETICS-podobne i wentylowane panele elewacyjne, przewidziane do zastosowań zewnętrznych) i właściwości cieplnych.

Ocena trwałości obejmowała szeroko zakrojone badania właściwości fizycznych i mechanicznych mieszanin HDG i WG, a także testy udarności i przyczepności przeprowadzone na próbkach paneli, jak następuje:

- porowatość;
- absorpcja wody (test kapilarności);
- przepuszczalność pary wodnej;
- zamrażanie – zachowanie odwilżowe;
- zamrażanie w obecności soli odladzających;
- odporność na karbonatyzację;
- reaktywność alkaliczna agregatów;
- oznaczanie lotnych związków organicznych (VOC);
- testy szoku termicznego;
- siła wiązania między warstwami HDG i EPS (panele ETICS-podobne);
- odporność na uderzenia ETICS-podobnych i wentylowanych paneli elewacyjnych;
- wytrzymałość na zginanie WGP przed i po cyklach zamrażania i rozmrażania;
- testy ogniowe WGP.



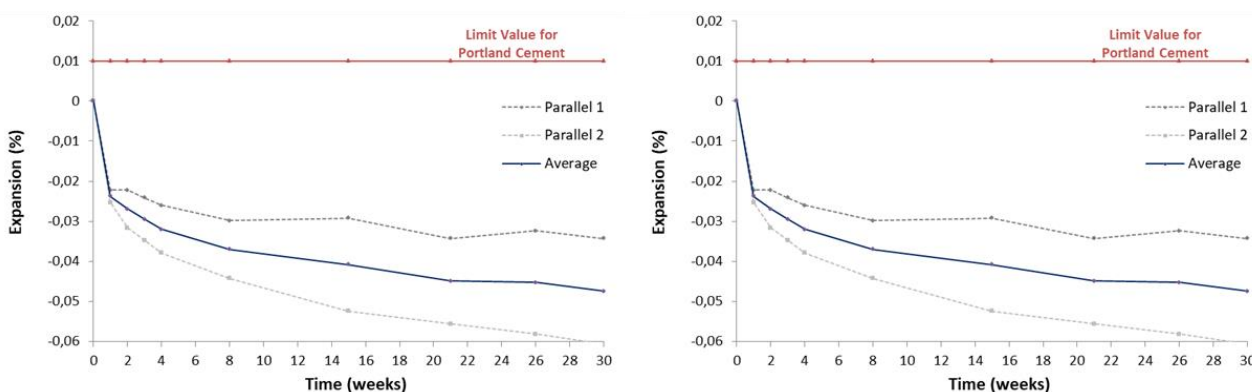
Ryc. 30. Przykłady sprzętu i próbek do badań materiałów (porozymetria Hg, zmiana długości w teście ASR, odporność na karbonatyzację)



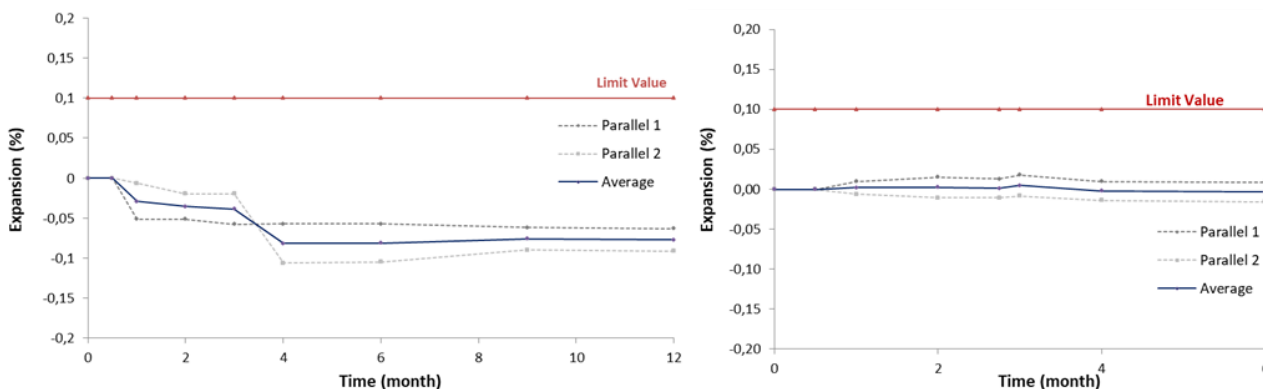
Ryc. 31. Przykłady testowania próbek paneli (cykl hydrotermiczny, mrozoodporność, wytrzymałość na zginanie)

Testy przeprowadzono najpierw na próbkach przygotowanych laboratoryjnie, a następnie na próbkach z produkcji pilotażowej. Większość wyników na panelach była porównywalna z panelami na bazie cementu. Absorpcja wody była nieco wyższa, tj. 1,02 kg/m² (dla panelu ETICS-podobnego) niż wymagana w ETAG 004 (gdzie powinna wynosić ≤ 1%), a w przypadku wyższych wartości absorpcji wody wymagany jest test zamrażania. Przeprowadzono badanie odporności na zamrażanie i rozmrażanie, które potwierdziło, że nie wystąpiły uszkodzenia po 30 cyklach zamrażania i rozmrażania.

W celu poprawy odporności na uderzenia siatka została wbudowana w panele podczas produkcji pilotażowej, co ulepszyło produkty do grupy „Strefa II”, co oznacza, że panele nadają się do stref podatnych na uderzenia przez rzucające lub kopane przedmioty, ale w miejscach publicznych gdzie wysokość ETICS-podobnych paneli ograniczy wielkość uderzenia.



Ryc. 32. Odporność na siarczany próbek z produkcji laboratoryjnej (po lewej) i produkcji pilotażowej (po prawej) (testowana zgodnie z ASTM C1012 / C1012M)



Ryc. 33. Reaktywność krzemionki alkalicznej w próbkach z produkcji laboratoryjnej (po lewej) i z produkcji pilotażowej (po prawej) (badana zgodnie z ASTM C 227-10)

Odporność chemiczna została oceniona kilkoma metodami, takimi jak reaktywność z krzemionką alkaliczną (ASR), odporność na karbonatyzację i testy ekspozycji na siarczany. Wyniki wszystkich tych testów wykazały, że panele geopolimerowe były odporne na karbonatyzację, a narażenie na roztwory chemiczne siarczanów i zasad nie spowodowało ekspansji materiałów poza granice określone dla materiałów bazowych cementu (Ryc. 32 i Ryc. 33).

Wyniki testów uzyskane na panelach laboratoryjnych i pilotażowych wykazały dobrą korelację, co oznacza, że proces skalowania został właściwie zaprojektowany i wykonany.

Testy wydajności cieplnej

Modułowe elementy promieniujące zostały przetestowane w pomieszczeniu typu płaszcz o objętości 130 m³, które zawiera pomieszczenie testowe o objętości 40 m³ zaprojektowane zgodnie z normą EN 14240. Testy wydajności cieplnej przeprowadzane są w warunkach ustalonych: moc dostarczana lub pochłaniana przez panel radiacyjny jest równoważona przez manekiny termiczne lub system aktywny. Pomiar stałej czasowej wykonuje się metodą przejściową, narzucając stopniowe nagrzewanie i mierząc reakcję termiczną na powierzchni panelu.

W przypadku paneli ETICS-podobnych odporność termiczna jest określana za pomocą urządzenia płyty grzejnej Taurus TLP 800 zgodnie z normą UNI EN ISO 8302 (błąd szacunkowy 3%). Zbadano cztery próbki:

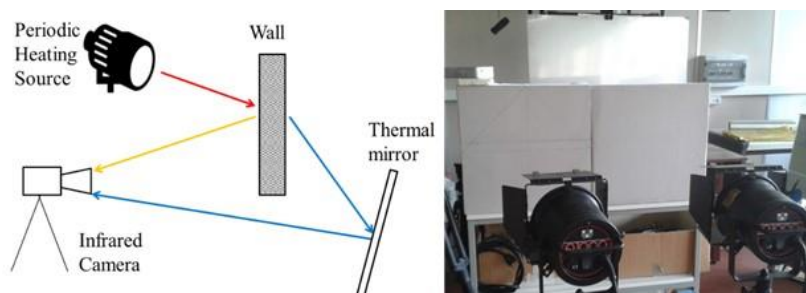
- dwie próbki ETICS, 26A (partia AMS 6 2018/06/26) i 26B (partia CNR-ICMATE 2018/08/01),
- dwie płyty EPS (grubość nominalna 50 i 20 mm).

Tabela 3. Wyniki badań termicznych próbek paneli ETICS-podobnych

Próbka	Grubość [mm]	Odporność termiczna przy 10°C [m ² K ⁻¹ W ⁻¹]	Odporność termiczna przy 30°C [m ² K ⁻¹ W ⁻¹]
26A	79,1	2,04	1,88
26B	78,4	2,05	1,89
Durosol #1	50,0	1,51	1,40
Durosol #2	19,6	0,61	0,56

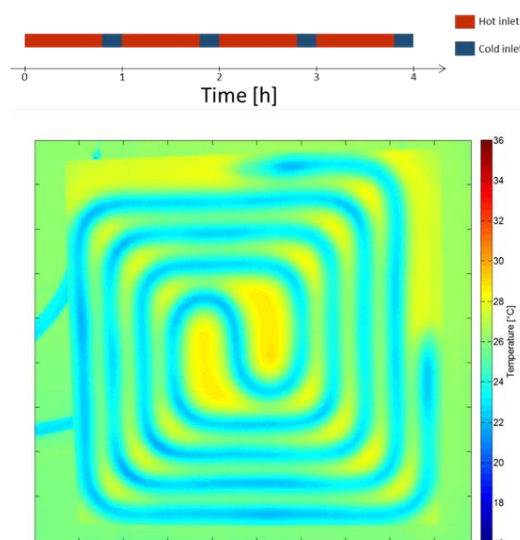
Podczas testowania właściwości cieplnych paneli ETICS-podobnych norma ISO 13786:2018 opisuje metodę obliczania dynamicznych właściwości cieplnych ścian. Obecnie nie są dostępne żadne standardy laboratoryjnego pomiaru tych wartości. Dlatego proponujemy metodę testowania paneli InnoWEE.

Zmierzone profile temperatury sekwencji termicznej są wyśredkowane, skalowane i wyposażone w model sinusoidalny. Przesunięcie czasowe oblicza się jako różnicę czasu między maksymalną wartością zarejestrowaną na przedniej i tylnej powierzchni próbki. Ostateczny wynik to średnia z wielokrotnego wyboru 2 okresów w eksperymencie. Począwszy od wartości mierzonej, można przedłużyć wyniki do 24 godzin.



Ryc. 34. Metoda InnoWEE do testowania wydajności termicznej paneli ETICS-podobnych

Zaproponowano nowy test, oparty na warunkach przejściowych, w celu zweryfikowania trwałości geopolimerycznych paneli promieniujących. Test obciążeniowy polega na dostarczeniu badanemu panelowi ciepłej i zimnej wody o określonym cyklu czasowym. Cykl powtarza się wiele razy, aby przypominać użycie panelu w rzeczywistych warunkach użytkowania. Termografia w podczerwieni i monitorowanie wizualne wykazały, że stan panelu był taki sam przed i po powtórzeniu setek cykli.



Ryc. 35. Test obciążeniowy dla promieniujących paneli

2.5. Certyfikacja innowacyjnych produktów

Zgodnie z przepisami UE oznakowanie CE jest obowiązkowe dla produktów objętych rozporządzeniem w sprawie wyrobów budowlanych (CPR), jeżeli istnieje zharmonizowana norma wyrobu. Może to stanowić problem w przypadku nowych lub innowacyjnych produktów nieobjętych lub nieobjętych w pełni normami zharmonizowanymi (hEN).

Producenci innowacyjnych produktów, takich jak panele InnoWEE, nieobjętych hEN, mogą uzyskać oznakowanie CE poprzez Europejską Ocenę Techniczną (ETA) i związaną z tym Ocenę i Weryfikację Stałości Właściwości Użytkowych (AVCP).

Jednostka ds. Oceny Technicznej (TAB) wydaje ETA na podstawie Europejskiego Dokumentu Oceny (EAD) przyjętego przez Europejską Organizację ds. Oceny Technicznej (EOTA). W ramach tej procedury wymagania dotyczące produktów powinny uwzględniać siedem podstawowych wymagań podanych w CPR:

1. Odporność mechaniczna i stabilność,
2. Bezpieczeństwo na wypadek pożaru,
3. Higiena, zdrowie i środowisko,
4. Bezpieczeństwo i dostępność w użyciu,
5. Ochrona przed hałasem,
6. Oszczędność energii i zatrzymywanie ciepła,
7. Zrównoważone wykorzystanie zasobów naturalnych.

ETA zawiera zatem informacje na temat zamierzonego zastosowania i wydajności produktu. AVCTP to zharmonizowany system określający sposób oceny produktów i kontroli stałości wyników oceny.

Po wydaniu pierwszej ETA, EAD zostaje opublikowany i jest dalej wykorzystywany jako zharmonizowana specyfikacja techniczna (podobnie jak zharmonizowana norma); umożliwiając ustalenie oznakowania CE.

Produkty można wprowadzać do obrotu również w drodze krajowej procedury oceny, która podlega jurysdykcji państw członkowskich i może różnić się w zależności od państwa. W przypadku krajowej oceny technicznej należy przestrzegać przepisów krajowych, ale oznakowanie CE nie jest możliwe.

3. Pilotażowa instalacja i produkcja nowych paneli

Do produkcji paneli HDG InnoWEE potrzebna była odpowiednia linia produkcyjna. AMSolutions z Grecji wykonało szczegółową analizę potrzeb i wymagań oraz projekt pilotażowej linii produkcyjnej. Zastosowano metodologię 6σ (sześć sigma), aby zapewnić najlepszy projekt i efektywny proces produkcji.

3.1. Instalacja pilotażowa – Główne cechy

Osoby nie znające branży i jej specyficznej terminologii dotyczącej znaczenia zakładu pilotażowego mogą być zdezorientowane. Najnowocześnieszą, prostą i dokładną definicję terminu „instalacja pilotażowa” można podsumować następująco:

Instalacja pilotażowa jest elastycznym przedkomercyjnym systemem produkcyjnym, który wykorzystuje wyniki nowej technologii w skali laboratoryjnej, mające na celu skalowanie produkcji laboratoryjnej i/lub produkcję niewielkich ilości nowych produktów opartych na technologii, głównie w celu poznania nowej technologii.

Dzięki temu prostemu wyjaśnieniu możemy naprawdę zidentyfikować wykorzystanie Instalacji Pilotażowej i główne cele, które są wielopoziomowe, ponieważ uzyskana wiedza jest następnie wykorzystywana do projektowania pełnowymiarowych systemów produkcyjnych i produktów komercyjnych, a także do identyfikacji dalszych celów badawczych i wsparcia decyzji inwestycyjnych.

Należy jednak zrozumieć, że pilotażowa instalacja obiekt złożony i wymagający rozwoju od samego początku do końca. Inwestor musi wziąć pod uwagę wszystkie ryzyka związane z produkcją, w zależności od charakteru produktu, który musi zostać przeskalowany. Ponadto należy ostatecznie zająć się kwestiami finansowymi (kosztami instalacji pilotażowej) i oczywiście kwestiami środowiskowymi, które mogą wzrosnąć podczas eksploatacji. Inwestycja staje się jeszcze trudniejsza, ponieważ w wielu przypadkach należy uwzględnić złożone procesy produkcyjne i dostosować je do projektu i rozwoju pilotażowej instalacji. Dlatego w większości przypadków elastyczność linii produkcyjnych, zapewniająca możliwość modyfikacji zgodnie z potrzebami każdego procesu produkcyjnego i testowego, jest podstawowym kluczowym czynnikiem, który należy poważnie rozważyć.

W rezultacie staje się oczywiste, że instalacja pilotażowa nie jest łatwa do zbudowania i jest raczej droga i trudna w utrzymaniu bez użycia wysoce doświadczonego i wykwalifikowanego personelu.

3.2. Definicja strategii skalowania

Próba zwiększenia skali paneli HDG nie była łatwym zadaniem. Od samego początku było jasne, że konieczne jest przyjęcie nowoczesnych metodologii i technik w celu osiągnięcia pożądanego rezultatu.

Dlatego AMS, wykorzystując wcześniejsze doświadczenia zdobyte podczas pilotażu w ostatnich latach, postanowił wdrożyć do produkcji paneli HDG metodologię 6σ , która została po raz pierwszy opracowana i przedstawiona przez Motorolę w latach 80. XX wieku, znaną jako DMAIC, co oznacza: **Definiuj, Mierz, Analizuj, Ulepszaj, Kontroluj** (Define, Measure, Analyse, Improve, Control).

Za pomocą bardzo prostych słów DMAIC jest „procedurą opartą na analizie przypadków stosowaną do ulepszania i/lub optymalizacji i/lub zwiększania skali procesów i wreszcie wytwarzania produktów bez wad”.

Definiuj: Pierwszym krokiem jest identyfikacja wszystkich produktów i wymagań produkcyjnych, które określą wymagania projektowe i ramy. Ten krok jest niezwykle ważny, ponieważ wymagania te poprowadzą zespół projektantów do tych procedur i technik w celu zapewnienia bezpiecznego opracowania ostatecznego projektu linii produkcyjnej lub produktu, a wreszcie ich wdrożenia w zakładzie pilotażowym

Mierz: Po zakończeniu pierwszego etapu oraz ustawieniu i przetestowaniu wszystkich wymaganych linii produkcyjnych i wyposażenia, w zakładzie pilotażowym zostanie wyprodukowany szereg próbek produktów i zostaną przetestowane pod kątem ich właściwości. Celem tej fazy jest nie tylko testowanie produktów, ale także wydajności linii produkcyjnej i sprzętu. Dlatego w zależności od początkowych wyników testów w tym okresie prób i błędów konieczne jest określenie najlepszego możliwego ustawienia linii produkcyjnych przy najwyższej jakości produktu

Analizuj: W całym okresie prób i błędów wszystkie wyniki są gromadzone i analizowane zgodnie ze średnimi wskaźnikami ważności, powtarzalności, jakości, a także opracowywana jest baza danych statystycznych, mająca na celu identyfikację obszarów błędów dla każdego aspektu związanego z procesem skalowania.

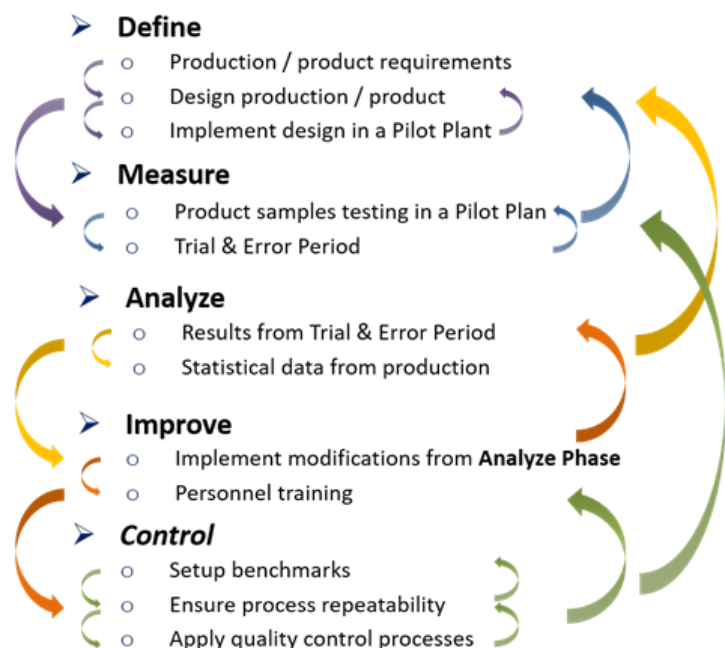
Ulepszaj: Wyniki fazy analizy oraz charakter błędów, pominięć, zaniedbań, problemów z jakością, które mogły powstać itp., stanowią wkład zespołu projektowego i/lub zespołu zarządzającego do przeprojektowania niektórych części lub elementów lub procesów na linii produkcyjnej lub nawet produktu końcowego, jeśli to konieczne, a nowy okres prób i błędów rozpoczyna się po tych samych procesach co w fazach Pomiar i Analiza, i może być powtarzany tyle razy, ile jest to konieczne w celu uzyskania pożądanego produktu i/lub procesu. Gdy wszystko jest zadowalające, personel jest szkolony w zakresie końcowych procesów, aby się z nimi zapoznać.

Kontroluj: Na tym etapie opracowywane są porównania jakości produktu końcowego, a zasady zapewnienia jakości są wdrażane w całym procesie w celu osiągnięcia stałej powtarzalności wszystkich procesów, które ostatecznie odzwierciedlą produkcję produktu, który będzie takich samych standardów jakości w każdej partii produkcyjnej.

DMAIC jest bardzo dynamiczny i można powiedzieć, że jest to samouczący się proces produkcyjny, ze względu na ciągłe pętle interaktywnych działań między etapami procesu, które mają na celu poprawę błędów, zaniedbań lub pominięć na każdym etapie procesu.



Ryc. 36. Metodologia DMAIC



Ryc. 37. Podsumowanie metodologii DMAIC

3.3. Mapa strategii skalowania

Każdy proces zwiększania skali wymaga nie tylko przestrzegania harmonogramu, ale także najważniejszego aspektu, który określa słabe i mocne strony samego produktu, ponieważ to determinuje każdy krok podczas procesu skalowania.

Aby lepiej zrozumieć produkty InnoWEE, przeprowadzono kilka dyskusji i spotkań z twórcami HDG, które pozwoliły zidentyfikować:

- materiały potrzebne do produkcji HDG;
- metodologię produkcji w skali laboratoryjnej;
- przybliżony czas trwania procesów (w skali laboratoryjnej);
- niektóre specyficzne wymagania procesów, np. lepkość pasty, wilgotność surowców itp.;
- niektóre z wymaganych urządzeń;
- główne cechy produktu, np. kształt, geometria, wymiary itp.

Chociaż nadal było wiele problemów związanych z pilotażową produkcją, które należało wyjaśnić i zakończyć przed rozpoczęciem, niektóre z najważniejszych problemów, które należy pilnie zidentyfikować i rozwiązać, to:

- procesy pomocnicze i narzędzia (jakie inne procesy byłyby potrzebne do produkcji pasty HDG, np. sprężone powietrze, zasilanie azotem, sprzęt do przechowywania itp.);
- zadania krytyczne (które określały czas produkcji i nie mogły być modyfikowane);
- „osoby wpływające” na zadania produkcyjne (które zadania miały wpływ na inne zadania produkcyjne i jak na nie wpływały);
- relacje między procesami (np. jaki byłby efekt, gdyby jeden proces się nie udał i jak wpłynęłoby to na inne procesy produkcyjne);
- zaangażowanie personelu (ilu pracowników jest potrzebnych do wykonania produkcji HDG, jakie są stanowiska robocze i jak można poprawić wydajność personelu podczas produkcji);
- kwestie zdrowia i bezpieczeństwa;
- warunki wstępne produkcji (co jest potrzebne przed rozpoczęciem produkcji, np. miejsce przechowywania surowców, warunki otoczenia na linii produkcyjnej itp.);
- co najważniejsze, konieczne było zidentyfikowanie wszelkich ukrytych problemów, które mogą już istnieć i mogą mieć kluczowe znaczenie dla procesu rozbudowy instalacji pilotażowej.

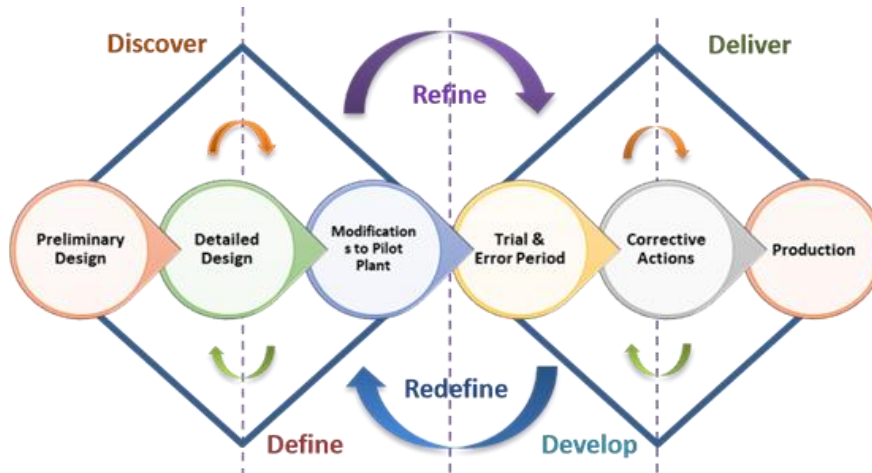
Udało się z powodzeniem zidentyfikować wszystkie parametry wszystkich tych problemów i wdrożyć rozwiązania w wciąż nieznanym procesie zwiększania skali, co okazało się niezwykle trudnym procesem, głównie ze względu na ilość i charakter nieznanych czynników i parametrów, które należy wziąć pod uwagę.

W związku z tym postanowiono wrócić do metodologii 6 σ i znaleźć rozwiązania w spisie narzędzi oraz dostosować narzędzie 4D lub Podwójnego Diamentu (Double Diamond) i podzielić cały proces na 6 etapów:

1. Projekt wstępny (w którym zidentyfikowano wszystkie problemy związane z projektem);
2. Szczegółowy projekt (gdzie cała produkcja i sprzęt jest szczegółowo zaprojektowany);
3. Modyfikacje w instalacji pilotażowej (wszystkie modyfikacje szczegółowego projektu wdrożono w instalacji pilotażowej);
4. Okres prób i błędów (testowanie linii produkcyjnej i procesów produkcyjnych);

5. Działania naprawcze (wszystkie działania naprawcze, które są wdrażane na linii produkcyjnej w procesach, jak zostały one zidentyfikowane w okresie prób i błędów);
6. Wreszcie, faktyczna produkcja pasty HDG.

Za pomocą narzędzia 4D opracowano sekwencję interaktywnych działań pomiędzy fazami produkcji, w których istnieje ciągła pętla akcji-testowania-naprawy-produkcji-testowania, i tak dalej.



Ryc. 38. Sześć faz procesu produkcyjnego

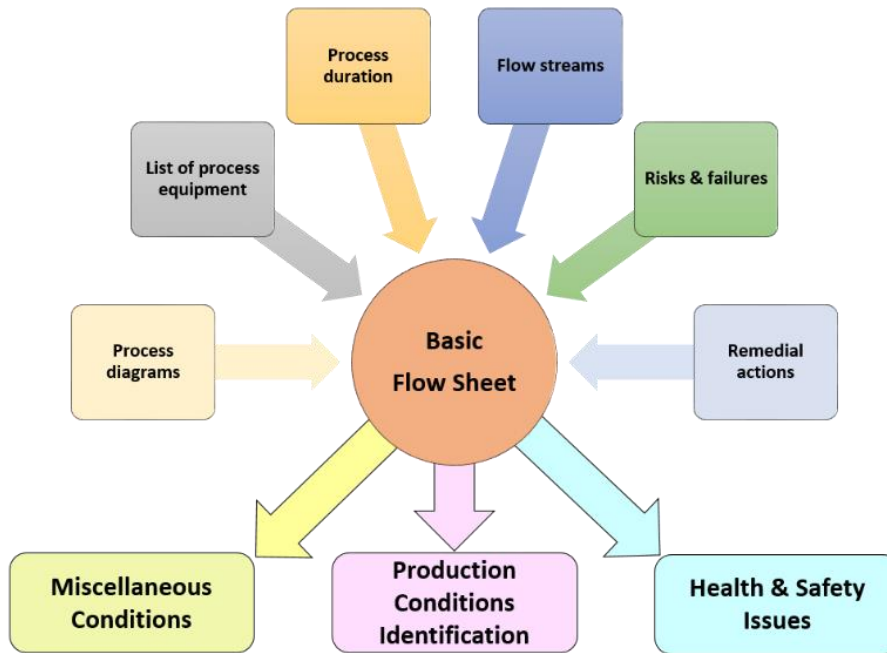
3.4. Projekt Wstępny

Podstawowy Arkusz Działań

Najważniejszym dokumentem dla ogólnego projektu linii produkcyjnej w zakładzie pilotażowym jest Podstawowy Arkusz Działań (Basic Flow Sheet). Gromadzi wszystkie szczegóły i wyniki z produkcji w skali laboratoryjnej i implementuje je w blokach lub pudełkach wskazujących na ich relacje i przebieg produkcji, co zostanie opisane w dalszej części tej prezentacji.

W skrócie, Podstawowy Arkusz Działań pomaga projektantom zidentyfikować:

- wymagana produkcja i czas jej trwania;
- używany sprzęt;
- potrzebne narzędzia;
- wszelkie procesy pomocnicze, które mogą być zaangażowane;
- rola personelu;
- warunki produkcji;
- specyficzne wymagania projektowe;
- „czynniki wpływające” na projekt;
- wszelkie możliwe problemy dotyczące zdrowia i bezpieczeństwa;
- Polityka Zapewnienia Jakości;
- punkty odcięcia produkcji (gdzie i jak produkcja zatrzymuje się w przypadku awarii lub wadliwych produktów);
- środki zaradcze, które należy zastosować w przypadku każdego rodzaju awarii.



Ryc. 39. Struktura Projektu wstępnego

Należy podkreślić, że Podstawowy Arkusz Działań jest manifestem A-Z, gdy występuje proces zwiększania skali.

Bez względu na to, co wydarzy się w przyszłości, np. jeśli inwestor zdecyduje się na dalszą rozbudowę pasty HDG, zastosowany zostanie ten sam proces, jak w opisie Podstawowego Arkusza Działań.

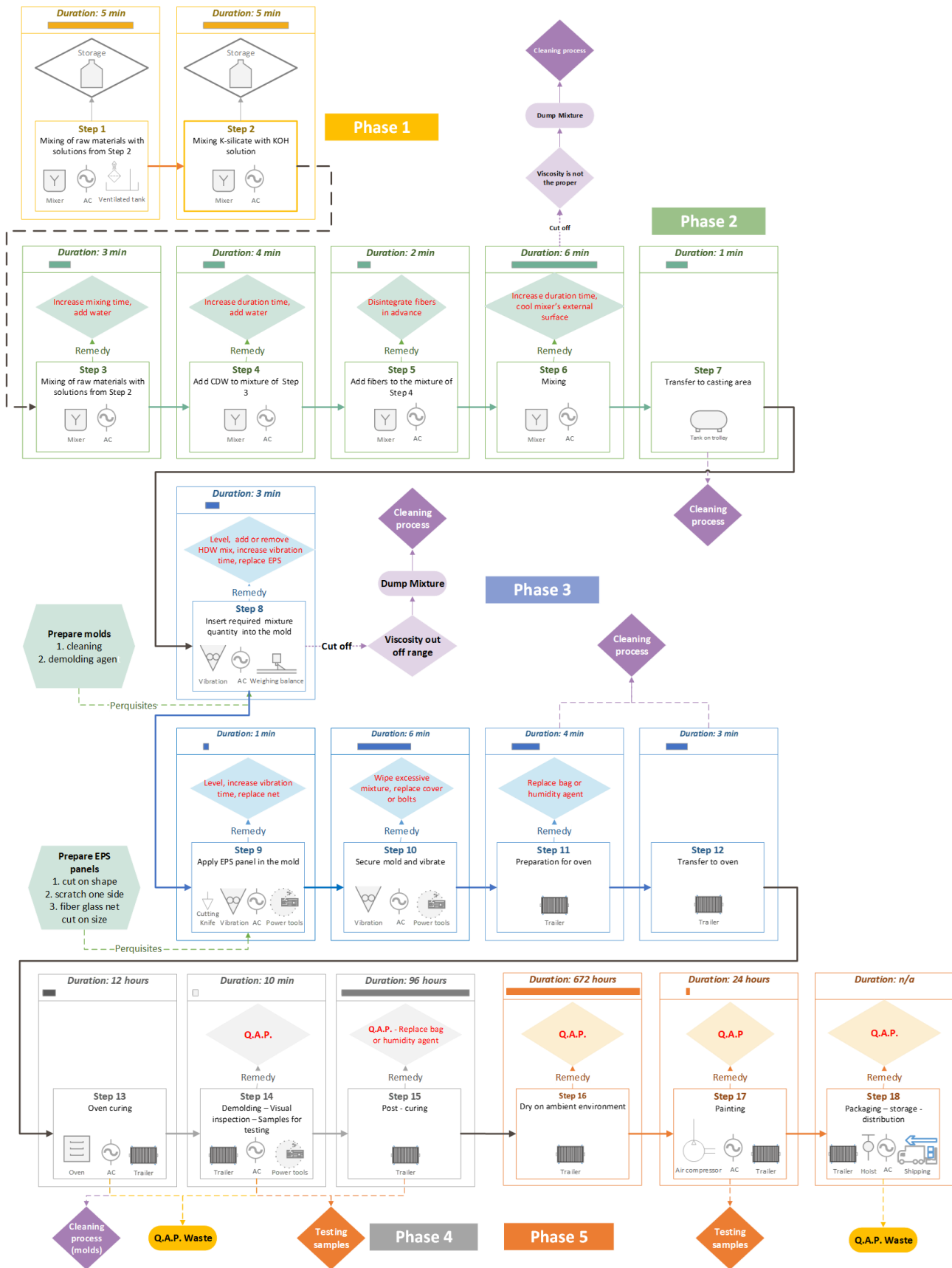
Dlatego jest uważany za dokument ogólny i cała produkcja pasty HDG byłaby silnie uzależniona od opisanych w nim procesów.

Analiza Podstawowego Arkusza Działań

Jak wspomniano wcześniej, Podstawowy Arkusz Działań ma określony format bloków, które są w stanie dostarczyć nam informacji o każdym indywidualnym procesie.

W Arkuszu poniżej (Ryc. 40) można go łatwo zidentyfikować:

- Patrząc na górze z oszacowaniem czasu trwania procesu;
- Na dużych blokach na dole z wyposażeniem; narzędzia i procesy pomocnicze stosowane podczas procesu produkcyjnego;
- Jakie są wymagania przed rozpoczęciem produkcji;
- W których punktach produkcji produkcja zostanie zatrzymana w przypadku pomyłki lub niepowodzenia;
- I najważniejsze, jakie są działania naprawcze, muszą być przestrzegane dla każdego procesu.



Ryc. 40. Podstawowy Arkusz Działań

Tabela 4. Przykłady problemów podczas procesu produkcyjnego i sposoby ich rozwiązania

Możliwa awaria i/lub ryzyko	Działanie naprawcze
Waga mieszanki nie jest zgodna z recepturą	Dodaj lub usuń mieszaninę z formy
Powierzchnia mieszanki jest nierówna	Użyj pacy do jej wypoziomowania i/lub zwiększ czas wibracji
Podczas wibracji na powierzchni mieszanki nie pojawiają się pęcherzyki powietrza	Zwiększ prędkość wibracji, aż pojawią się pęcherzyki powietrza, lub zwiększ czas wibracji
Wady EPS (połamane krawędzie, niezarysowana strona itp.)	Wymień EPS
Wygląda na to, że mieszanina nie ma odpowiedniej lepkości	Wykonaj test lepkości
Test lepkości nie jest prawidłowy	Wyrzuć mieszaninę
Niska lepkość	Dodaj wodę
Wysoka lepkość	Zwiększaj proporcjonalnie ilości surowców
Mieszanina nie jest jednorodna	Zwiększ czas mieszania, aby uzyskać pełną homogenizację (jeśli nie dodane w kroku 3)
Mieszanina nagrzewa się podczas mieszania	Zmniejsz liczbę obrotów na minutę na ostrzu miksera i/lub ostudź zewnętrzną powierzchnię miksera
Farba jest nierówna na powierzchni	Przestrzegaj zasad zapewniania jakości (QAP)
Farba nie jest dobrze nakładana	
Farba nie ma odpowiedniego odcienia	
Farba nie schnie w wyznaczonym czasie	

Idąc dalej przez Podstawowy Arkusz Działań, możemy zobaczyć wyniki tej analizy w formie skróconej w Tabela 5, na przykład:

- wymagania dotyczące wyposażenia i jak te wymagania wpływają na projekt;
- jakie ryzyka wiążą się z bieżącym procesem;
- jakie są minimalne wymagania i względy dotyczące narzędzi wykorzystywanych w określonym procesie;
- jakie inne udogodnienia i usługi są potrzebne do sprawnego funkcjonowania tego procesu;
- minimalne problemy BHP podczas procesu;

- oraz w jaki sposób proces ten wpływa na inne procesy produkcyjne i potrzeby, które należy wziąć pod uwagę na etapie szczegółowego projektowania.

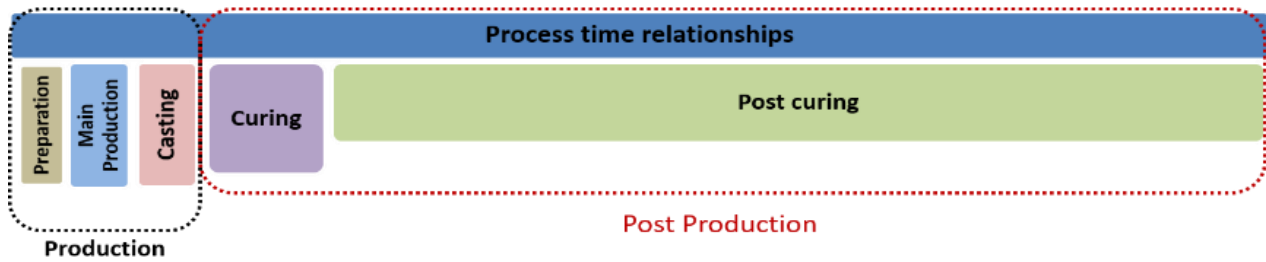
Tabela 5. Wymagania linii produkcyjnej

Zadanie	Należy wziąć pod uwagę
Wybór odpowiedniego pojemnika do przechowywania surowców stałych (np. naczynia, zbiorniki, silosy, worki itp.)	Masa
	Waga
	Absorpcja wody
	Odporność na korozję
	Toksyczność
	Granulometria – morfologia
	Inne szczególne właściwości chemiczne
	Generowanie pyłu
	Aglomeracja
Warunki otoczenia	Temperatura
	Wilgotność
	Przepływ powietrza – wentylacja
Konserwacja – czyszczenie	Łatwość dostępu
	Łatwość operacji
Pojemność magazynu	Według partii – na żądanie
Obsługa	Wciągniki, dźwigi, wózki widłowe, palety
Narzędzia pomocnicze	Odkurzacz do czyszczenia
	Sprężone powietrze do czyszczenia
	Zaopatrzenie w wodę do czyszczenia
	Drenaż
Inne włączone procesy	Zapewnienie jakości (QAP)
	Testowanie próbek
Wyposażenie ochrony osobistej	Zgodnie z planem BHP
Czynniki decyzyjne projektowania	<i>Geometria powierzchni magazynowej – przestrzeń</i>
	<i>Typ surowców</i>
	<i>Warunki otoczenia</i>

Symulacje produkcji i relacje kluczowych procesów

Na podstawie wyników przedstawionych powyżej tabel oraz różnych symulacji i matryc modelujących byliśmy w stanie:

1. zidentyfikować ścieżki krytyczne całego procesu i opracować diagram PERT wskazujący ich relacje;
2. przygotować schemat stanowisk pracy, aby każdy pracownik dokładnie wiedział, co należy zrobić i jak;
3. analizować relacje procesów produkcyjnych (w jaki sposób i w jakim stopniu każdy proces wpływa na drugi).



Ryc. 41. Relacje czasu procesu

Rezultatem było:

- ustalono warunki linii produkcyjnej – ograniczenia;
- przyjęto warunki pilotażowe – ograniczenia;
- zidentyfikowano awarie i ryzyka podczas produkcji.

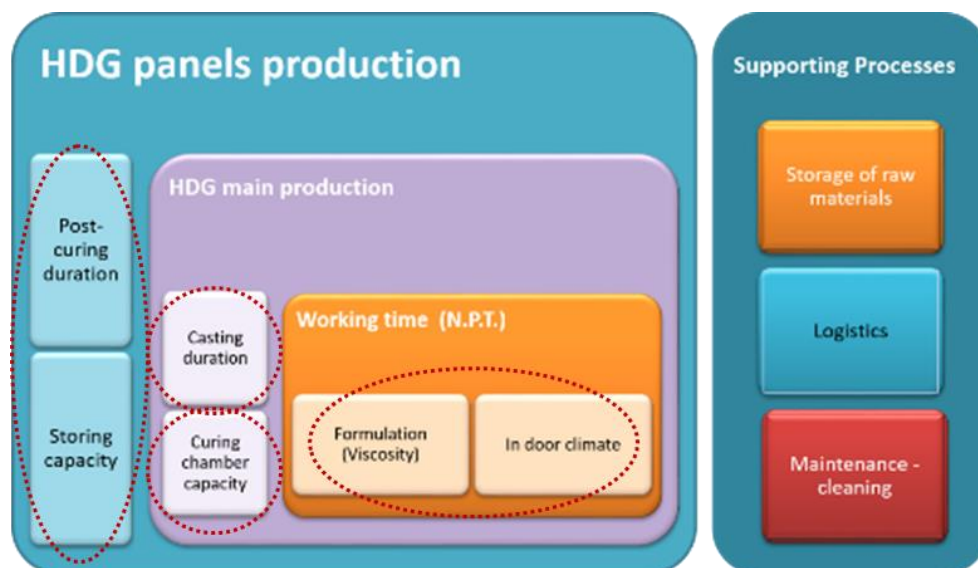
Podsumowując, zidentyfikowano i wyróżniono najważniejsze czynniki i parametry kluczowe dla zwiększenia skali paneli HDG.

Ze względu na charakter pasty HDG najważniejszym zidentyfikowanym czynnikiem był czas produkcji netto (NPT). Innymi słowy, czas, w którym pasta HDG pozostaje możliwa do obróbki przed stwardnieniem. Czas ten został skwantyfikowany w 120 minut, choć dalsza poprawa została osiągnięta na późniejszych etapach projektu przez CNR. Wykazano, że NPT we wszystkich testach w skali laboratoryjnej zależał od:

- lepkości preparatu (im lepsza pasta, tym niższy NPT);
- warunków wewnętrznych w czasie produkcji (cieplejsze otoczenie podczas produkcji powoduje niższy NPT).

Odlew był w rzeczywistości najbardziej wymagającym procesem, zarówno pod względem czasu, jak i zasobów. Na przykład panel ETICS-podobny potrzebuje co najmniej 5 minut na odlanie i zabezpieczenie, podczas gdy panel elewacji wentylowanej potrzebuje co najmniej 7 minut.

Fazy utwardzania i po utwardzeniu wymagały dużo czasu na ich zakończenie w porównaniu z innymi procesami, np. panel ETICS-podobny można wytworzyć w ciągu 20 minut (do odlewania), podczas gdy proces utwardzania i utwardzania końcowego dla tego samego panelu wymaga 108 godzin (tj. 6480 minut).



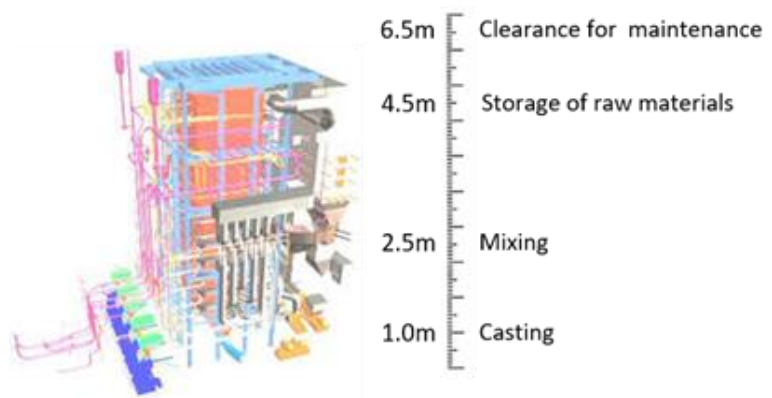
Ryc. 42. Relacje kluczowych procesów produkcyjnych

Ten stan ma poważny wpływ na tryb produkcji operacji pilotażowej. W takim przypadku działanie instalacji pilotażowej powinno odbywać się w trybie partiovym (produkcja paneli w partiach), a nie w trybie ciągłym (produkcja ciągła). Dodatkowo, jako efekt uboczny całego procesu zwiększania skali, silnie wpływa na logistykę produkcji. Duże ilości produkowanych paneli wymagałyby większych pieców lub sprzętu suszącego oraz większej pojemności do przechowywania po utwardzeniu, dlatego należy osiągnąć równowagę między procesami, a wszystkie te parametry należy starannie uwzględnić na etapie produkcji.

Zasada projektowania linii produkcyjnej do zwiększania skali

Do produkcji materiałów półpłynnych (w postaci pasty) zwykle stosuje się dwie różne metodologie produkcji:

1. Produkcja wieżowa lub grawitacyjna, w której wszystkie surowce są umieszczane w obszarach magazynowych jeden na drugim i przetwarzane na dole obszarów magazynowych w celu utworzenia ostatecznej pasty. Ta metoda została pomyślnie wdrożona przez AMS w projekcie LEEMA, bardzo podobna do metodologii InnoWEE, ale oczywiście nie taka sama.

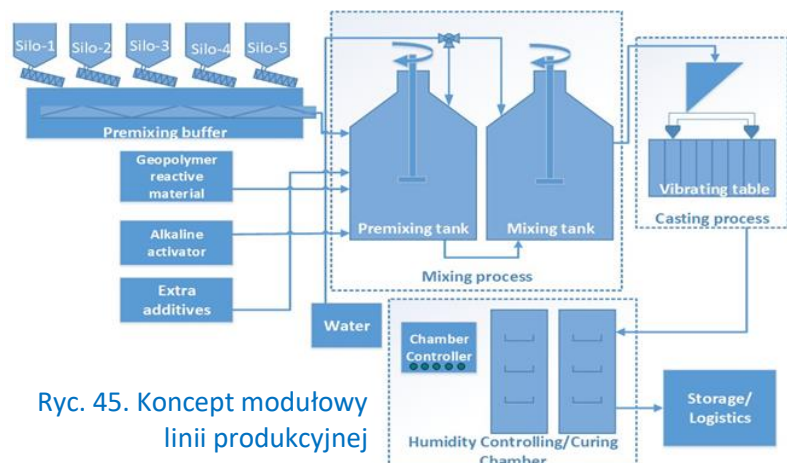


Ryc. 43. Instalacja typu „Wieża” lub grawitacyjna



Ryc. 44. Linia produkcyjna projektu LEEMA

2. Modułowa konstrukcja, w której moduły są umieszczane w różnych lokalizacjach lub obszarach w zakładzie pilotażowym, tworząc linię produkcyjną, w której każdy moduł wykonuje osobny proces zaprogramowany do wykonania.



Ryc. 45. Koncept modułowy linii produkcyjnej

Naszym wyborem był projekt modułowy do produkcji pasty HDG InnoWEE. Przyczyny wynikały ze szczegółowych wyników projektu.

Po pierwsze, w zakładzie pilotażowym AMS istniało ograniczenie wysokości. TUPP nie może pomieścić wysokości 7 m wymaganej do zaprojektowania wieży (jak na Ryc. 43 powyżej).

Jednak nawet gdyby wysokość była wystarczająca, aby pomieścić instalację pilotażową opartą na wieży, nie wybralibyśmy jej. Ponieważ potrzebna była elastyczna linia produkcyjna, gdzie modyfikacje wyposażenia i/lub procesów mogłyby być zaadoptowane szybko i łatwo, co byłoby trudne w pilotażowej wieży. Dodatkowo, ze względu na niepewność produkcji pasty HDG (nie będącej technologią sprawdzoną w branży, gdzie moglibyśmy gromadzić dane związane z jej zachowaniem i wydajnością), było oczywiste, że tego rodzaju modyfikacje i adaptacje wystąpią. Dlatego (jak udowodniono później) niezbędny był szereg modyfikacji w celu uzyskania optymalnej wydajności linii produkcyjnej, co pozwoliło nam operować nią w trybie produkcji seryjnej lub ciągłej.

Mając doświadczenie w projekcie LEEMA i wieży pilotażowej obsługiwanej w tym projekcie, wiedzieliśmy, że linia produkcyjna musi być łatwo dostępna do obsługi, ale także do jej utrzymania, a tak naprawdę nie uzyskano tego w projekcie LEEMA, ponieważ była wyjątkowo trudna w obsłudze i utrzymaniu.

Ze względu na budowę modułową, potrzeba obsługi linii produkcyjnej opiera się głównie na automatyzacjach, które powinny być na niej obowiązkowo wdrażane ze względu na charakter zaangażowanych procesów, co prowadzi do zminimalizowania interakcji człowiek-proces produkcji, co przekłada się na lepszą kontrolę i mniejszą liczbę zaniedbań, błędów lub pominięć podczas produkcji.

Zasada Projektu “Modułowego”

Rozpoczynając projekt InnoWEE i po wynikach projektu wstępnego, naszym początkowym pomysłem było zbudowanie instalacji pilotażowej o modułowej konstrukcji w trybie pojedynczego wsadu o wadze 350 kg na partię.

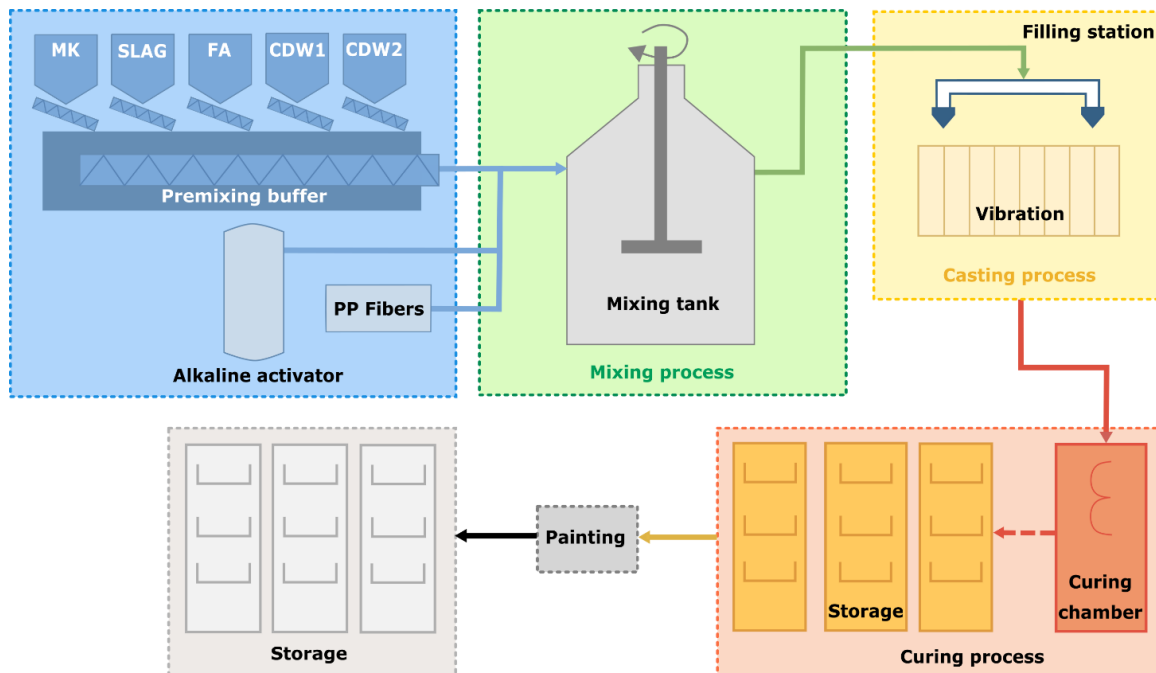
Rzeczywiście, wyniki szczegółowego projektu wskazują, że:

- wstępny mikser nie był konieczny w trzecim module;
- drugi moduł nie był konieczny;
- najważniejsze, że proces czyszczenia nie został właściwie rozwiązany. Warto wspomnieć, że czyszczenie jest bardzo ważnym procesem podczas produkcji HDG, ponieważ konieczne jest właściwe czyszczenie mieszalników, pomp i instalacji rurowych, aby uniknąć zablokowania lub uszkodzenia sprzętu, z powodu szybkiego zestalenia się pasty HDG.

Dlatego nowa i ostateczna zasada linii produkcyjnej zakładu pilotażowego jest następująca:

- praca modułowa zgodnie z ograniczeniami TUPP, np. ograniczenia wysokości, geometria przestrzeni itp., zostały przyjęte;
- drugi mikser został zmodyfikowany i wykorzystany jako pomocnicza linia produkcyjna w przypadku awarii głównego miksera;
- przyjęta metodologia produkcji zakłada produkcję do 700 kg pasty HDG na partię (± 60 –80 paneli);
- przekształcenie tej wydajności partii na jeden dzień produkcji (8-godzinna zmiana), wydajność instalacji pilotażowej wynosi do 2800 kg (± 240 –320 paneli);
- ta konfiguracja umożliwia pracę w trybie ciągłym, jeśli to konieczne;
- większość procesów (prawie 80%) to procesy automatyczne lub półautomatyczne;
- w ten sposób zminimalizowana jest interwencja człowieka podczas produkcji.

Niemniej jednak należy podkreślić, że ulepszone działanie instalacji pilotażowej, np. 4 partie dziennie, nie było wykonalne dla TUPP, ponieważ powodował inne skutki uboczne, głównie dla logistycznej części produkcji, np. do procesów utwardzania i po utwardzaniu ze względu na dużą liczbę wytwarzanych paneli, jak wyjaśniono wcześniej.



Ryc. 46. Modułowa produkcja HDG

Pilotażowa produkcja obejmuje następujące etapy: przygotowanie materiałów (EPS, krzemian potasu), premiks (premiks K-krzemianu z włóknami polipropylenowymi, podawanie surowców stałych do bufora wstępnego mieszania, przenoszenie surowców stałych do głównego miksera), mieszanie, odlewanie, utwardzanie, utwardzanie końcowe, montaż paneli, malowanie i czyszczenie. Szczegółowa produkcja wszystkich trzech rodzajów paneli HDG jest dostępna w następującym filmie: <https://www.youtube.com/watch?v=0TSx2FAvktc>



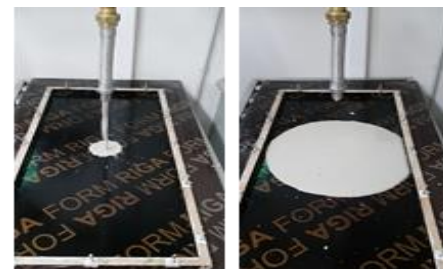
Ryc. 47. Premiks surowców stałych w buforze do wstępnego mieszania



Ryc. 48. Dostarczenie K-sil fo głównego miksera



Ryc. 49. Włókna PP do K-sil w głównym mikserze



Ryc. 50. Stanowisko wypełniania



Ryc. 51. Odlew



Ryc. 52. Komora utwardzania

Wydajność TUPP była powyżej oczekiwań, ponieważ ponad 400 paneli HDG (ETICS-podobnych, wentylowanych i promieniujących) wyprodukowano w bardzo ścisłym harmonogramie. Produkcja paneli HDG okazała się prosta i stosunkowo łatwa, o ile przestrzegane są określone warunki produkcji i ograniczenia związane z właściwościami materiału (głównie czas pracy i czas utwardzania HDG).

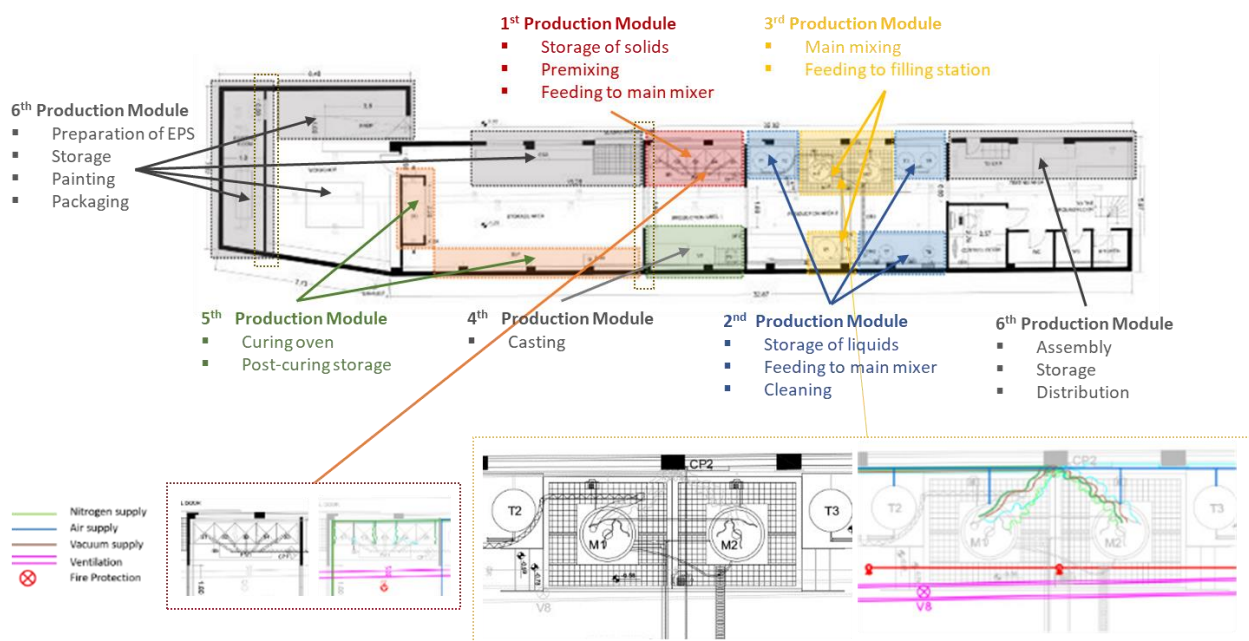


Ryc. 53. Produkcja zwiększania skali paneli ETICS-podobnych

3.5. Szczegółowy projekt

Instalacja pilotażowa zwiększania skali technologii (TUPP)

Instalacja pilotażowa AMS zlokalizowana jest 22 km na północ od centrum Aten w dzielnicy Acharnes I zajmuje powierzchnię 552 m².



Ryc. 54. Układ modułów TUPP

Instalacja pilotażowa jest wyposażona w:

1. Całą wymaganą infrastrukturę (zasilanie elektryczne, BIM, woda i woda dejonizowana, drenaż septyczny, sprzęt przeciwpożarowy, zaawansowany system wentylacji, sieć dystrybucji gazów i wykrywania awarii, sprężone powietrze itp.)
2. Systemy pomocnicze (systemy zasilania awaryjnego, takie jak UPS i generatory, dedykowane serwery do sterowania BIM, systemy monitorowania i sterowania itp.)
3. W pełni wyposażone laboratorium do szerokiego zakresu badań
4. Szeroką gamę maszyn i urządzeń, np. miksery, przenośniki, zbiorniki, ślimaki, silniki, malarnia itp.

TUPP został podzielony na 6 różnych modułów, z których pierwszy moduł obejmuje przechowywanie surowców stałych i wszystkie procesy obejmujące wstępne mieszanie i podawanie do głównego miksera. Drugi moduł jest przeznaczony do przechowywania płynnych surowców i procesy zależne od materiałów płynnych, takich jak podawanie do głównego miksera i czyszczenie. Serce instalacji pilotażowej znajduje się w trzecim module, w którym odbywa się główne mieszanie i transport pasty HDG do stacji napełniania. Czwarty moduł jest przeznaczony wyłącznie do odlewania, ponieważ jest on najbardziej wymagający pod względem pracy i zasobów podczas produkcji. Piec do utwardzania i duży magazyn do późniejszego utwardzania produkowanych paneli znajdują się w 5. module, podczas gdy wszystkie inne czynności niezwiązane z produkcją pasty HDG, jak przygotowanie EPS, drewna, montaż, malowanie opakowań, są wykonywane w moduł nr 6.

Aby zrozumieć głębię projektowania każdego modułu, na Ryc. 54 można zobaczyć niektóre z procesów, które zostały zidentyfikowane i dostosowane do wymagań każdego modułu.

Symulacje i modelowanie linii produkcyjnej

Podczas eksploatacji instalacji pilotażowej w trybie modułowym należy upewnić się już na etapie projektowania, że linia produkcyjna będzie działała zgodnie z oczekiwaniami, a jednocześnie nie będzie sprzeczna z innymi procesami lub przepisami, które mogą mieć zastosowanie, oraz najważniejsze jest to, że podczas pracy jest bezpieczna dla personelu i środowiska.

Dlatego we wszystkich kluczowych procesach produkcyjnych wykonano serię symulacji i modelowania za pomocą zaawansowanego oprogramowania (przepływ rur). Krótko wspomniane:

1. Do linii zasilającej płynnych surowców (rurociągi i pompy);
2. Do ciepłej i zimnej wody użytej do produkcji pasty HDG (rurociągi, pompy i grzejniki);
3. Do procesu mieszania (zachowanie orurowania, łopatek miksera i pomp);
4. Do zasilania azotem wykorzystywanego do przechowywania surowców stałych (w celu uzyskania zmodyfikowanej atmosfery w silosach w celu uniknięcia wszelkiego rodzaju zanieczyszczeń, wilgoci itp.);
5. Ogólna wydajność pomp przy jednoczesnym działaniu;
6. Wreszcie, prawdopodobnie najważniejszą symulacją był proces czyszczenia całej linii produkcyjnej, w którym zidentyfikowano parametry i ograniczenia konieczne do przyjęcia w celu utrzymania linii produkcyjnej przez cały czas w dobrym stanie technicznym.

Projekt linii produkcyjnej i modyfikacje wyposażenia

Podczas projektowania linii produkcyjnej linia produkcyjna w TUPP i jej wyposażenie zostały zmodyfikowane i dostosowane do wymagań produkcji pasty HDG. Na przykład:

- zmodyfikowano główny mikser (dwukrotnie);
- dodano bufor wstępnego mieszania;
- ślimaki podające dostosowane do właściwej wysokości;

- wagi zostały przeprojektowane i skalibrowane;
- PLC zostały przeprogramowane (trzy razy w celu dostosowania optymalnych procesów);
- opracowano nową wagę dla głównego miksera;
- opracowano bardziej wyrafinowany projekt czujników obciążenia o dokładności 10 g.

W sumie wykonano ponad 200 modyfikacji istniejącej linii przed i w trakcie okresu testowego. Wdrożenie modyfikacji w TUPP rozpoczęło się w maju 2017r., a zakończono w maju 2018r., kiedy AMS rozpoczął produkcję paneli InnoWEE HDG.



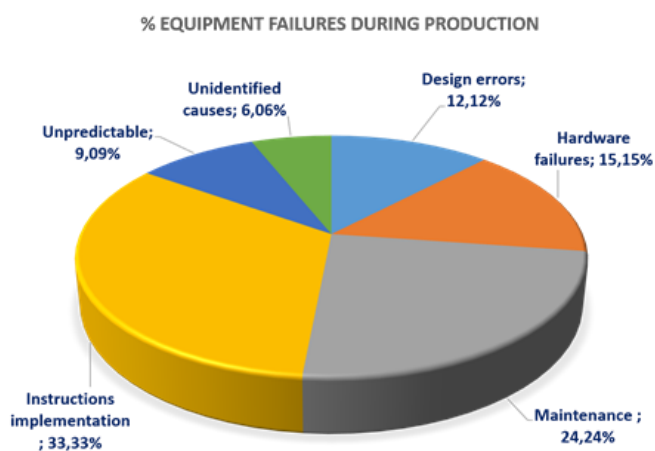
Ryc. 55. Okres czasu projektowania linii produkcyjnej i modyfikacji wyposażenia

3.6. Analizuj i Ulepszaj – Dane z produkcji

Produkcja – dane statystyczne

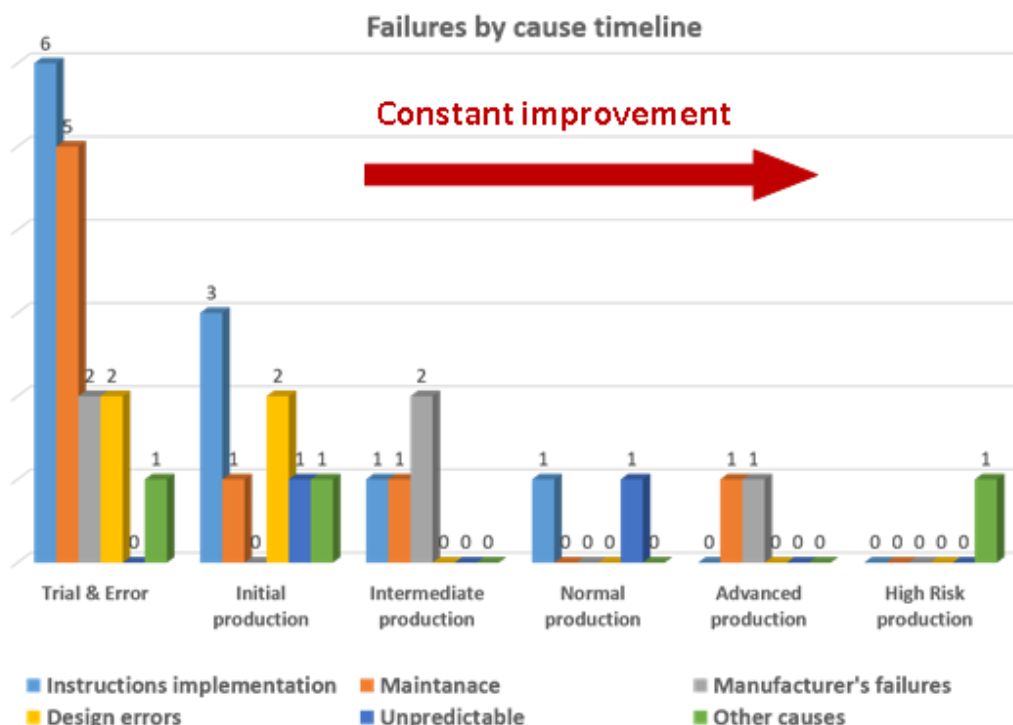
Jednym z kluczowych punktów metodologii 6σ, jak wspomniano powyżej, jest gromadzenie danych. Dane gromadzone we wszystkich procesach produkcyjnych (Ryc. 56) wskazują:

- 57,57% (19 awarii) – ingerencja człowieka (wdrożenie instrukcji 11, co odpowiada 33,33% i brak konserwacji 8, co odpowiada 24,24%),
- 12,12% (4 awarie) – błędy projektowe,
- 15,15% (5 awarii) - awarie sprzętowe producenta, oraz
- 9,09% (3 awarie) – z nieprzewidzianych lub innych przyczyn, takich jak lokalne awarie zasilania w rejonie Acharnes,
- 6,06% (2 awarie) – nie można zidentyfikować przyczyny i jest ona związana z awarią komponentu.



Ryc. 56. Rozkład uszkodzeń mechanicznych lub wyposażenia

Analizując dalej te dane, zaobserwowano, że istnieje ciągła poprawa między fazami produkcji, począwszy od fazy prób i błędów do fazy produkcji wysokiego ryzyka. Prawie 84,8% awarii wystąpiło w okresie instalacji pilotażowej (faza prób i błędów, partie początkowe i partie pośrednie), a tylko 6,06% z nich wystąpiło podczas normalnej produkcji paneli HGD.



Ryc. 57. Oś czasu awarii według przyczyny

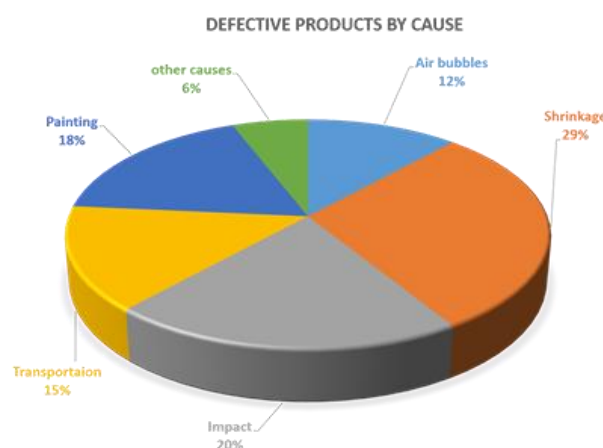
Ponadto, analizując stopień wystąpienia awarii, zauważamy, że 64,5% tych awarii miało niewielkie znaczenie, a tylko 7,75% stanowiły awarie wysokiego ryzyka (warto wspomnieć, że wystąpiły one podczas ogólnych przerw w dostawie prądu na etapie produkcji z powodu warunków pogodowych w całym miesiącu).

Ale najważniejszym aspektem statystyki są prawdopodobnie statystyki dotyczące całkowitej produkcji:

- wyprodukowano 416 paneli (w tym testy laboratoryjne),
- przetworzono ponad 3000 kg pasty geopolimerowej,
- faktyczny czas produkcji wynosił 53 dni (podczas gdy 27 z nich było w nocy, ze względu na ekstremalne warunki pogodowe – ciepło w Grecji latem).

Podczas gdy ogólną wydajność opartą na metodologii 6σ potwierdzają wyprodukowane wadliwe panele:

- produkcja paneli ETICS-podobnych: 2,1%,
- wentylowane panele fasadowe: 0,63%;
- panele promieniujące: 0,33%.

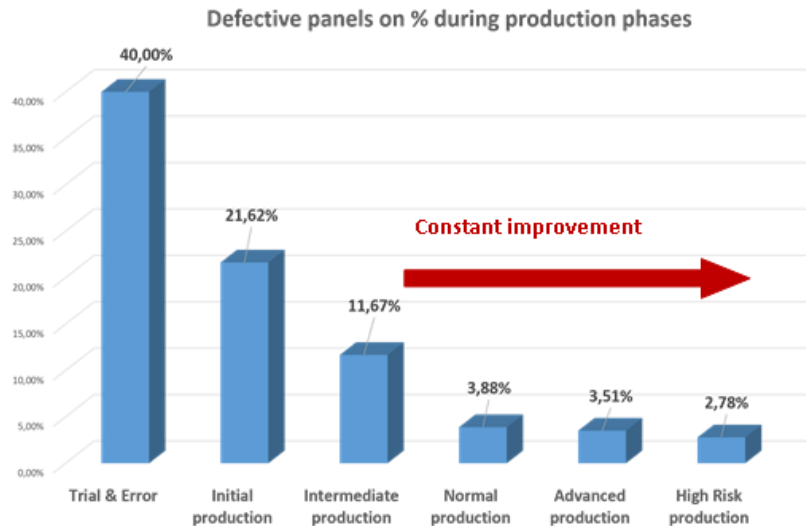


Ryc. 58. Wadliwe produkty według przyczyny

Analizując przyczyny powstałych defektów, były one zwyczajne dla każdej produkcji materiałów budowlanych, takie jak defekty udarowe, podczas transportu, kurczenia itp., ale warto wspomnieć, że prawie połowa defektów (49%) wystąpiła przez interwencję człowieka niezbędną w procesie produkcyjnym.

Jednak patrząc na dane liczbowe analizy występowania defektów, jasne jest, że większość defektów (67,64%) pojawiła się na etapie przygotowania

procesu produkcyjnego, gdzie procedury produkcyjne nie zostały zakończone, a personel nie był zaznajomiony z produkcją pasty HDG, podczas gdy na późniejszych etapach produkcji znacznie spadły wady produkcyjne, wykazując ciągłą poprawę.



Ryc. 59. Wadliwy odsetek paneli w każdym etapie produkcji

Ranking 6σ

Jak już wspomniano, metodologia 6σ jest ukierunkowana na wytwarzanie produktów o zerowej liczbie wad. W większości przypadków, szczególnie w przypadku pilotażowej produkcji, nie jest to wykonalne i dotyczy produkcji zaawansowanych technologicznie, takich jak aeronautyka, elektronika itp., w których ingerencja człowieka jest ograniczona. W naszym przypadku faktycznym zakresem stosowania metodologii 6σ jest ciągłe samodoskonalenie wdrożonych procesów produkcyjnych i utrzymanie jakości wytwarzanych produktów na tym samym poziomie.

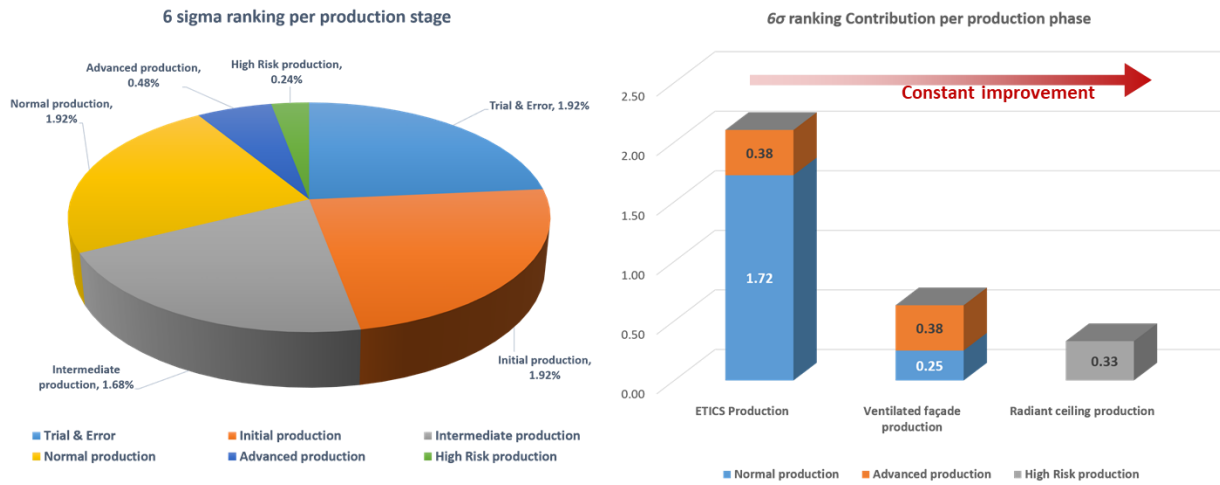
Sigma level	Sigma shift	Defective Parts Per Million	Percent defective	Percentage yield
1	Initial Start -0.5	691,462	69%	31%
2	0.5	308,538	31%	69%
3	1.5	66,807	6.7%	93.3%
4	End of ETICS Production 2.5	6,210	0.62%	99.38%
5	3.5	233	0.023%	99.977%
6	6σ TARGET 4.5	3.4	0.00034%	99.99966%
7	5.5	0.019	0.0000019%	99.9999981%

Ryc. 60. Ranking wydajności TUPP w metodologii 6σ dla produkcji paneli ETICS-podobnych

Kiedy rozpoczęto produkcję paneli HDG, w okresie prób i błędów efektywność instalacji pilotażowej wynosiła od poziomu 1 do 2, w produkcji paneli ETICS-podobnych skuteczność wzrosła od poziomu 3 do 4 i była utrzymywana na tym samym poziomie podczas wszystkich rodzajów produkcji paneli.

Ale z liczb jasno wynika, że na każdym etapie wadliwe produkty były redukowane, co wskazuje na ciągłą poprawę procesu produkcyjnego.

Wreszcie, ogólny ranking 6σ wynosił 3,06% między poziomami 3 i 4, podczas gdy zwykły ranking dla pilotażowej produkcji zakładu wynosi między poziomami 2 i 3, co dowodzi, że produkcja paneli HDG w TUPP była wyższa niż standardy przemysłowe, a działanie TUPP było z powodzeniem powyżej oczekiwanej wydajności.



Ryc. 61. Analiza fazy produkcyjnej w rankingu 6σ

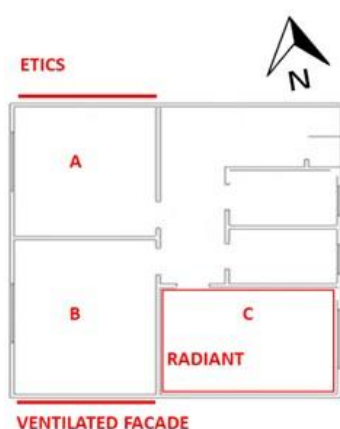
4. Instalacja, system monitorowania i ocena wydajności w rzeczywistych budynkach demonstracyjnych

Po zwiększonej produkcji wykonanej w Grecji przez AMSolutions panele zostały przetransportowane i zainstalowane w 4 budynkach demonstracyjnych w Padwie (Włochy), Atenach (Grecja), Bukareszcie (Rumunia) i Putte-Mechelen (Belgia). Były one dokładnie monitorowane przed i po instalacji, aby ocenić parametry termiczne w rzeczywistych warunkach, a także obserwowano trwałość. Wyniki monitorowania wykorzystano również w symulacjach przeprowadzonych na wirtualnych budynkach demo w celu zweryfikowania wpływu i skuteczności interwencji. Instalacje były następujące:

- Dom pilotażowy w Padwie (Włochy) – panele ETICS-podobne, wentylowana fasada, panele sufitowe promieniujące;
- Stary ratusz w Voula, niedaleko Aten (Grecja) – panele ETICS-podobne, wentylowana fasada;
- Dom opieki Don Orione w Bukareszcie (Rumunia) – panele ETICS-podobne;
- Ekologiczny dom mieszkalny w Putte-Mechelen (Belgia) – promieniujące panele sufitowe.

4.1. Dom pilotażowy, teren CNR w Padwie, Włochy

W domu pilotażowym zainstalowano trzy rodzaje rozwiązań panelowych: panele ETICS-podobne, wentylowane panele elewacyjne i promieniujące (Ryc. 62). Ze względu na szczególne cechy prefabrykowanej konstrukcji, której ściany składają się z płyt warstwowych z metalową powierzchnią zewnętrzną, metody instalacji zostały dostosowane i mogą różnić się od innych obiektów demonstracyjnych.



Ryc. 62. Lokalizacja każdego rodzaju paneli na planie domu pilotażowego w Padwie, którego południowa i wschodnia fasada jest pokazana po prawej stronie

Instalacja paneli ETICS-podobnych

Na północnej ścianie zainstalowano 28 paneli ETICS-podobnych (Ryc. 63) według następującej procedury:

- wyrównanie paneli podstawowych przez dolny profil metalowy;
- nałożenie odpowiedniego kleju na strukturę blachy;
- ustawienie paneli i zastosowanie łączników termicznych przechodzących przez ścianę i przykręconych od strony wewnętrznej;



Ryc. 63. Panele ETICS-podobne zainstalowane na północnej ścianie domu pilotażowego

- wypełnienie połączeń między panelami odpowiednim elastycznym klejem;
- montaż metalowej obróbki blacharskiej w celu ochrony górnych i bocznych krawędzi instalacji.

Instalacja wentylowanych paneli elewacyjnych

30 wentylowanych paneli elewacyjnych zostało zainstalowanych na ścianie południowej (Ryc. 64) za pomocą dedykowanej stalowej ramy zakotwiczonej do gleby i przymocowanej do budynku tylko u góry, aby ograniczyć perforację ściany, w następujący sposób:

- mocowanie 4 kolumn ramy stalowej za pomocą śrub;
- wiercenie paneli w 4 punktach (2 otwory w górnej części, 2 w dolnej);
- mocowanie łączników do poziomych profili ramy;
- montaż paneli za pomocą kołków rozporowych;
- montaż metalowej obróbki blacharskiej w celu ochrony górnej i bocznych krawędzi instalacji.



Ryc. 64. Wentylowane panele elewacyjne montowane na południowej ścianie domu pilotażowego

Instalacja paneli radiacyjnych

W wewnętrznym pokoju zainstalowano 30 paneli promieniujących, opartych na 7 stalowych profilach omega, które podtrzymywały sufit podwieszany z płyt gipsowo-kartonowych (Ryc. 65). W celu zapewnienia właściwej temperatury i zapewnienia niezbędnego natężenia przepływu dla systemu paneli promiennikowych zmodyfikowano system zaopatrzenia w wodę. Dodano dwa nowe rurociągi, jeden dla panelu radiacyjnego i jeden dla osuszacza. Panele zostały połączone w systemie Tichelmana w celu uzyskania takich samych strat ciśnienia na zasilaniu i powrocie. Pięć serii po 6 paneli połączono równolegle.



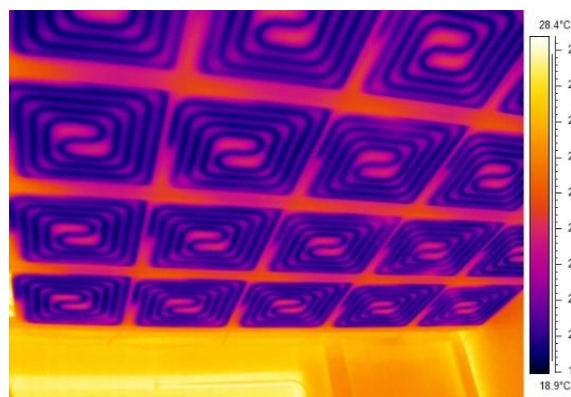
Ryc. 65. Wcześniej zamontowany sufit podwieszany (po lewej), zastąpiony przez panele promieniujące InnoWEE (po prawej)

Monitorowanie wydajności i trwałości

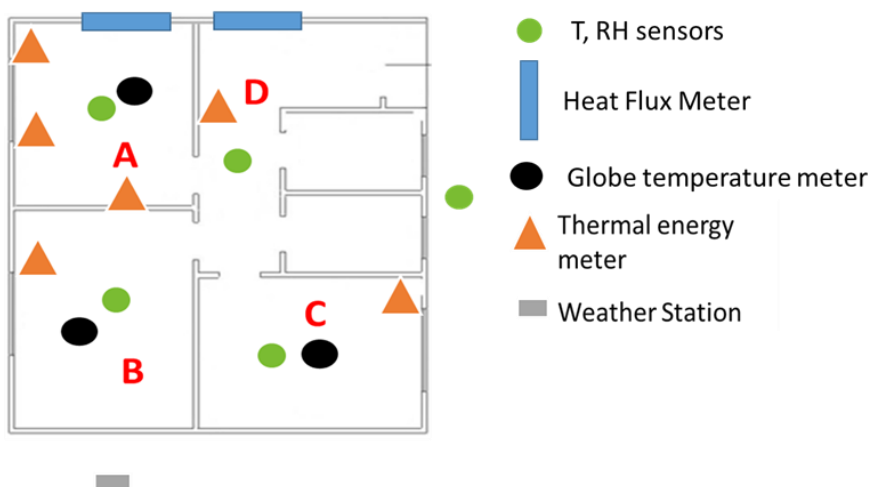
W skład systemu monitorowania wchodzi:

- jeden czujnik strumienia ciepła zainstalowany w północnej ścianie budynku w celu obliczenia przenikalności cieplnej ściany przed i po montażu paneli ETICS-podobnych;
- sześć ciepłomierzy (miernik strumienia, miernik temperatury wody na wlocie i wylocie), po jednym dla każdego zainstalowanego klimakonwektora, aby poznać zużycie energii w każdym pomieszczeniu, jeden dla paneli promiennikowych i jeden dla osuszacza;

- cztery różne czujniki mikroklimatyczne w pokojach, aby poznać ich wewnętrzne warunki termiczne;
- specjalne instrumenty do kampanii ad hoc do oceny wydajności cieplnej ściany i sufitu;
- zewnętrzna stacja pogodowa do monitorowania temperatury zewnętrznej i warunków klimatycznych;
- pomiary termometrem kulowym prowadzone w sezonie zimowym i letnim przed i po instalacji w celu obliczenia termohigrometrycznych warunków wewnętrznych (PMV i PPD).

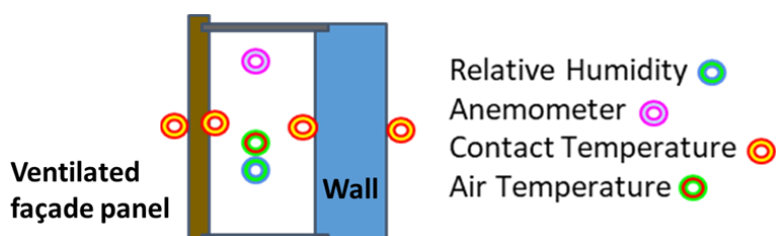


Ryc. 66. Panele promieniujące monitorowane podczas pracy w trybie chłodzenia



Ryc. 67. Lokalizacja sprzętu monitorującego dla paneli ETICS-podobnych i radiacyjnych na planie budynku

Zainstalowane lokalne monitorowanie wentylowanych paneli elewacyjnych składa się z czujników temperatury kontaktowej, temperatury wnętrza powietrznej, prędkości powietrza i wilgotności. Monitorowanie w podczerwieni pokazuje również wydajność zainstalowanych paneli promiennikowych w porównaniu do wcześniej zainstalowanego sufitu. Rozkład temperatury powierzchni jest porównywalny z testami laboratoryjnymi wykonanymi przed instalacją w miejscu pilotażowym.

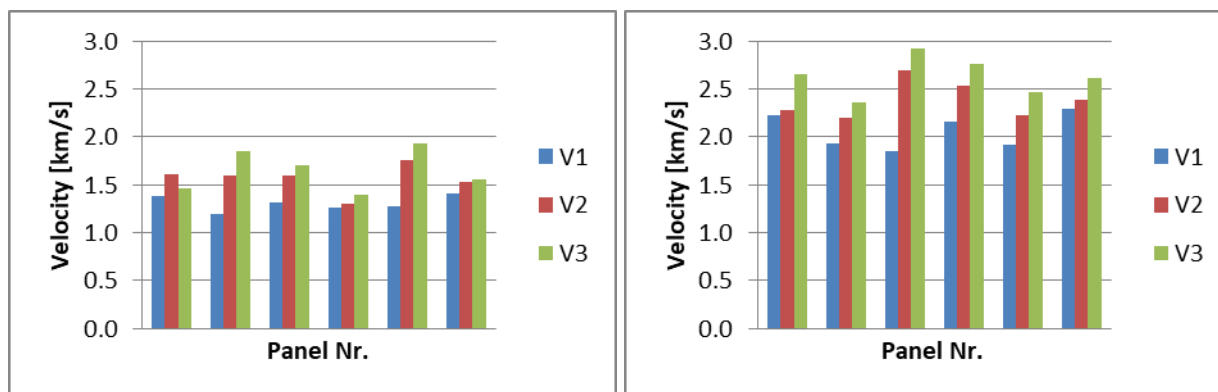


Ryc. 68. Zainstalowany sprzęt do monitorowania wydajności wentylowanych paneli elewacyjnych

Zbadano również rozwiązania zewnętrzne pod względem trwałości i odporności na zużycie. Na podstawie wstępnych badań w laboratorium wybrano następujące metody badawcze: absorpcja wody powierzchniowej (SWA), twardość powierzchniowa (SHT), czas przepływu impulsu ultradźwiękowego (UPV) oraz test Eigen (rezonansowy) oparty na częstotliwości (EFT).

W budynku testowym w Padwie monitorowano wentylowaną fasadę znajdującą się po południowej stronie budynku oraz fasadę ETICS-podobną znajdującą się po północnej stronie budynku. Do tej pory przeprowadzono trzy serie pomiarów: wiosną 2019 r., jesienią 2019 r. i na koniec lata 2020 r., aby osiągnąć cały rok eksploatacji.

Na Ryc. 69, odpowiednio, jako przykład przedstawiono wyniki testu prędkości impulsu ultradźwiękowego dla fasady wentylowanej i typu ETICS.



Ryc. 69. Wyniki badań ultradźwiękowych prędkości impulsu dla elewacji typu wentylowanego (lewy) i ETICS (prawy).

Wszystkie wyniki wszystkich trzech serii badań NDT są porównywalne, co prowadzi do wniosku, że w lecie 2019 r. nie nastąpiło żadne pogorszenie jakości. Zarówno elewacje wentylowane, jak i ETICS działają dobrze.

4.2. Stary ratusz w Voula w Atenach, Grecja

W greckim budynku demonstracyjnym zainstalowano dwa rozwiązania zewnętrzne, tj. ETICS-podobne i wentylowane panele elewacyjne (Ryc. 70).



Ryc. 70. Lokalizacja każdego typu paneli w budynku demonstracyjnym

Instalacja paneli ETICS-podobnych

Ścianę do montażu paneli ETICS-podobnych przygotowano przez usunięcie kabli, przewodów rurowych i innych instalacji, a także usunięto luźną farbę i tynk. Stalowa belka w kształcie litery L została przymocowana do ściany, aby zapewnić dolne podparcie. Począwszy od strony wschodniej, do instalacji przygotowano panele ETICS-podobne. Na tylną stronę nałożono grubą warstwę pianki poliuretanowej (PU) o niskiej rozszerzalności w układzie zygzakowatym, a następnie panel umieszczono na miejscu i przymocowano do ściany za pomocą łączników termicznych. W przypadku kolejnych rzędów zastosowano tę samą technikę montażu co w przypadku montażu pierwszego rzędu paneli, z wyłączeniem etapów związanych z mocowaniem belki.

Do uszczelnienia połączeń każdego panelu zastosowano elastyczny uszczelniacz do fug. Zastosowano profil aluminiowy z 3 cm krawędzią w kształcie litery L, aby zakryć zagięcia i uskoki

okna. Piankę PU o niskiej rozszerzalności nałożono na jej tylną profilu i zabezpieczono śrubami i łącznikami. Wreszcie jego krawędzie zostały uszczelnione elastycznym uszczelniaczem do spoin i pomalowane wielofunkcyjną powłoką AMS. Ryc. 71 pokazuje ścianę przed i po instalacji.



Ryc. 71. Panele ETICS-podobne zainstalowane w greckim budynku demo

Instalacja wentylowanych paneli elewacyjnych

Aby zainstalować wentylowane panele elewacyjne, ściana została przewiercona tak daleko, jak to możliwe, pod kątem prostym za pomocą wiertła o średnicy M22 przymocowanego do młota wiertarskiego do głębokości 150 mm. Dwuskładnikową żywicę chemiczną wstrzyknięto do otworu kotwicy za pomocą pistoletu mechanicznego. Następnie kotwy pierwszego panelu (wszystkie 4) włożono do otworów. Ten sam proces powtórzono dla wszystkich innych paneli we wszystkich rzędach, ale zawsze dając wystarczająco dużo czasu na częściowe zestalenie żywicy, aby zapewnić dokładne wypoziomowanie sworzni. Nadmiar żywicy został odcięty za pomocą noża.

Podobnie, zastosowano aluminiowy profil zagięty na 3 cm w kształcie litery L, aby zakryć uskoki okna. Piankę PU o niskiej rozszerzalności nałożono na tylną stronę profilu i zabezpieczono śrubami i łącznikami. Wreszcie jego krawędzie zostały uszczelnione elastycznym uszczelniaczem do spoin i pomalowane wielofunkcyjną powłoką AMS. Ryc. 72 pokazuje ścianę przed i po instalacji.



Ryc. 72. Wentylowane panele elewacyjne zainstalowane w greckim demonstratorze

Monitorowanie wydajności i trwałości

W skład systemu monitorowania wchodzi:

- dwa czujniki strumienia ciepła zainstalowane w dwóch pomieszczeniach w północnej ścianie budynku w celu obliczenia przenikalności cieplnej ściany przed i po montażu paneli ETICS-podobnych. Czujniki temperatury zainstalowane w ścianie będą przydatne do poznania wewnętrznej i zewnętrznej temperatury powierzchni ścian zewnętrznych;
- dwa różne czujniki mikroklimatyczne w pokojach, aby poznać ich wewnętrzne warunki termiczne;
- zewnętrzna stacja pogodowa zainstalowana na dachu budynku;

- pomiary termometrem kulowym prowadzone w sezonie zimowym i letnim przed i po instalacji w celu obliczenia termo-higrometrycznych warunków wewnętrznych (PMV i PPD).

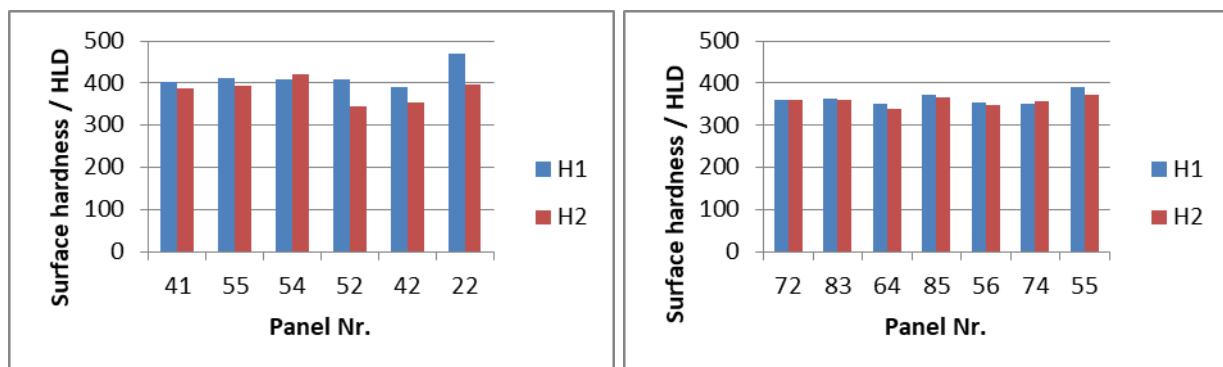
Monitorowanie zainstalowanej wentylowanej fasady jest podobne do monitorowania w budynku pilotażowym i składa się z czujników temperatury kontaktowej, temperatury wnęki powietrznej, prędkości i wilgotności powietrza.

Jeśli chodzi o trwałość i odporność na zużycie rozwiązań zewnętrznych, główny cel obiektu testowego w Atenach jest podobny do celów ośrodka demonstracyjnego w Padwie, tj. zbadanie trwałości fasad ETICS-podobnej i wentylowanej, ale w gorących warunkach klimatycznych regionu śródziemnomorskiego.

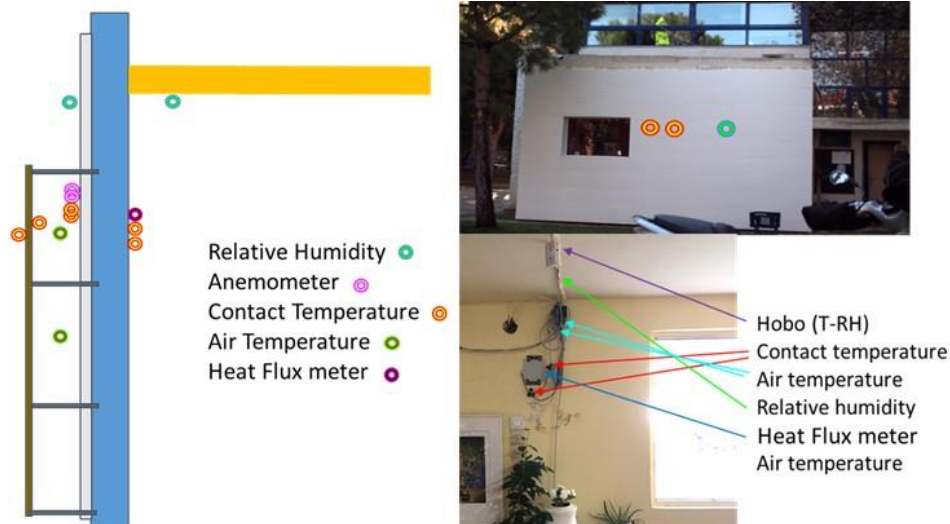
Zastosowano te same metody badawcze: absorpcję wody powierzchniowej (SWA), twardość powierzchniową (SHT), czas przepływu impulsu ultradźwiękowego (UPV) i test Eigen (rezonansowy) oparty na częstotliwości (EFT). W Atenach wentylowana fasada i fasada ETICS-podobna znajdują się po tej samej stronie budynku. Do tej pory przeprowadzono dwie serie pomiarów: wiosną 2019 r. i jesienią 2019 r. Dalsza ocena przewidziana na cały rok narażenia nie była możliwa ze względu na ograniczenia w przemieszczaniu się koronawirusa.

Na Ryc. 73 jako przykład przedstawiono wyniki testów twardości elewacji ETICS-podobnej i wentylowanej.

Wszystkie wyniki badań NDT z serii 2 są porównywalne z wynikami badań serii 1, co prowadzi do wniosku, że w lecie 2019 r. nie nastąpiło żadne pogorszenie. Zarówno elewacje wentylowane, jak i ETICS-podobne zachowują się dobrze.



Ryc. 73. Wyniki badania twardości powierzchni elewacji wentylowanej (po lewej) i ETICs (po prawej)



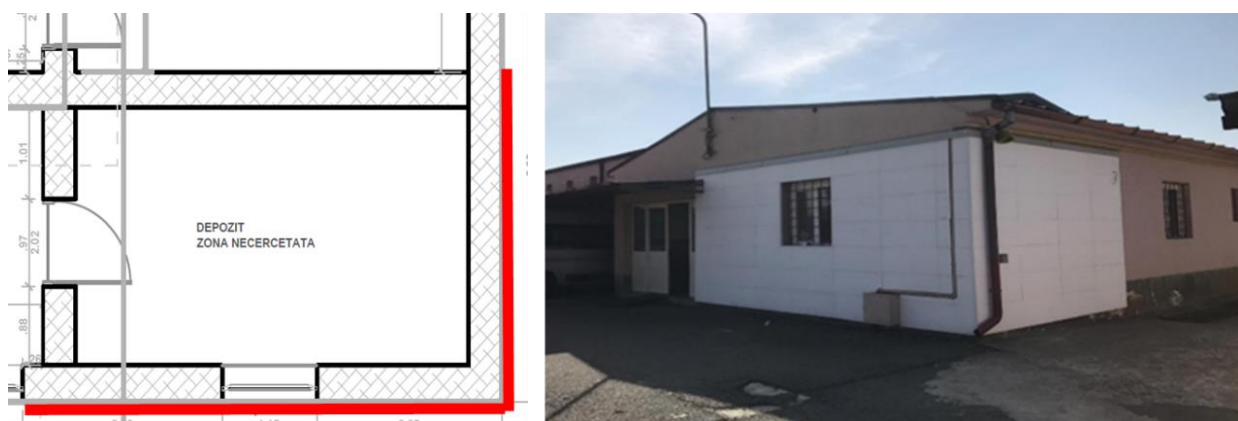
Ryc. 74. Sprzęt do monitorowania wentylowanej fasady (po lewej), fasady ETICS-podobnej (po prawej u góry) i warunków klimatycznych w pomieszczeniu (po prawej u dołu)

4.3. Dom opieki Don Orione w Bukareszcie, Rumunia

Instalacja paneli ETICS-podobnych

W rumuńskim demonstratorze panele ETICS-podobne zostały zainstalowane na dwóch fasadach jednopiętrowego budynku, tj. ścianach północno-wschodniej i północno-zachodniej (Ryc. 75).

Montaż 77 paneli ETICS-podobnych rozpoczął się od przymocowania do ściany profilu w kształcie litery L, służącego jako podparcie dolne. Instalacja rozpoczęła się od prawego dolnego panelu. Każdy panel został zainstalowany za pomocą zaprawy i łączników termicznych. Przed zainstalowaniem piątego rzędu paneli na ścianę na obwodzie okna nałożono profil w kształcie litery L 50x90 mm. Aby zapewnić ochronę przed infiltracją wody, na górnej stronie fasady przymocowano aluminiową obróbkę blacharską. Połączenia między panelami uszczelniono odpowiednim klejem.



Ryc. 75. Panele ETICS-podobne zainstalowane w budynku demonstracyjnym w Bukareszcie

Monitorowanie wydajności i trwałości

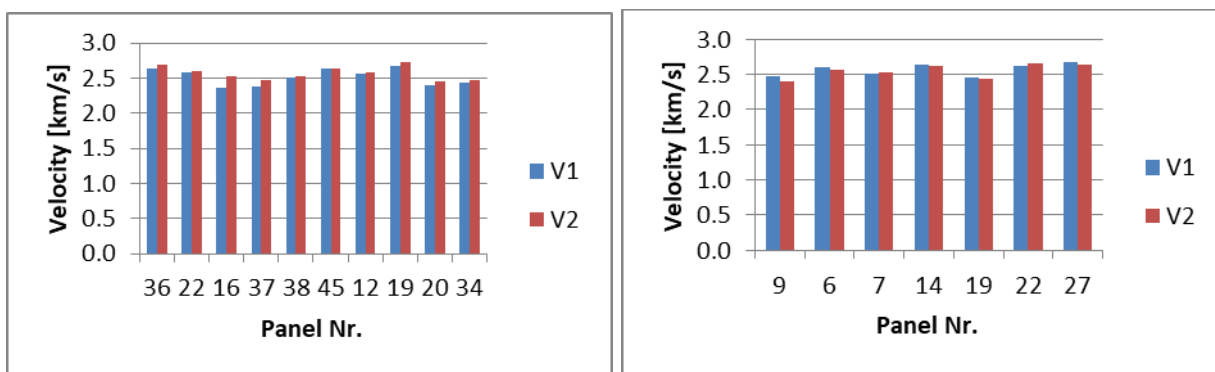
W skład systemu monitorowania wchodzi:

- czujnik strumienia ciepła zainstalowany w pomieszczeniu w północnej ścianie budynku w celu obliczenia przenikalności cieplnej ściany przed i po montażu paneli ETICS-podobnych;
- dwa różne czujniki mikroklimatyczne w pokojach: jeden w pokoju aby poznać wewnętrzne warunki termiczne i jeden blisko ściany zewnętrznej;
- Czujniki temperatury i UR zainstalowane na zewnątrz by mierzyć warunki zewnętrzne;

- Licznik energii elektrycznej do monitorowania zużycia energii dla ogrzewania i chłodzenia;
- pomiary termometrem kulowym prowadzone w sezonie zimowym i letnim przed i po instalacji w celu obliczenia termo-higrometrycznych warunków wewnętrznych (PMV i PPD).

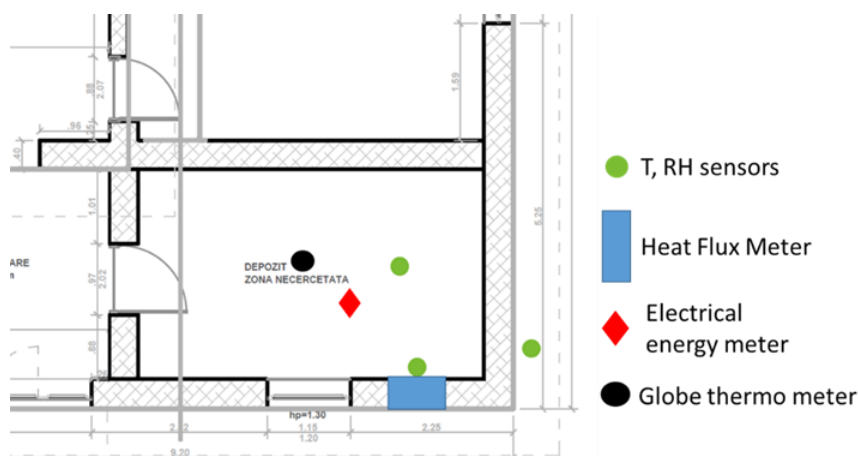
W odniesieniu do trwałości i odporności na zużycie, Bukareszt jest trzecim ośrodkiem demonstracyjnym o tych samych celach, co dwa poprzednio zaprezentowane, tj. testowanie trwałości paneli ETICS-podobnych w warunkach kontynentalnych z chłodną zimą i gorącym klimatem letnim. Zastosowano te same metody badawcze, co w przypadku lokalizacji demonstracyjnej w Padwie i Atenach. Do tej pory wykonano dwie serie pomiarów: wiosną 2019 roku i jesienią 2019 roku. Między pierwszą a drugą oceną fasada została przemalowana. Dalsza ocena przewidziana na cały rok narażenia nie była możliwa ze względu na ograniczenia w przemieszczaniu się koronawirusa.

Ponieważ przemalowanie nie powinno mieć większego wpływu na wyniki testów ultradźwiękowych, przedstawiono je jako przykład na Ryc. 76.



Ryc. 76. Wyniki badania ultradźwiękowego prędkości impulsu dla północnej (po lewej) i zachodniej (po prawej) fasady.

Ponieważ elewacja została przemalowana pomiędzy pierwszą a drugą oceną, ocena wyników testu jest dyskusyjna, nawet jeśli do tej pory nie odnotowano większych uszkodzeń – elewacje ETICS-podobne wypadają dobrze.

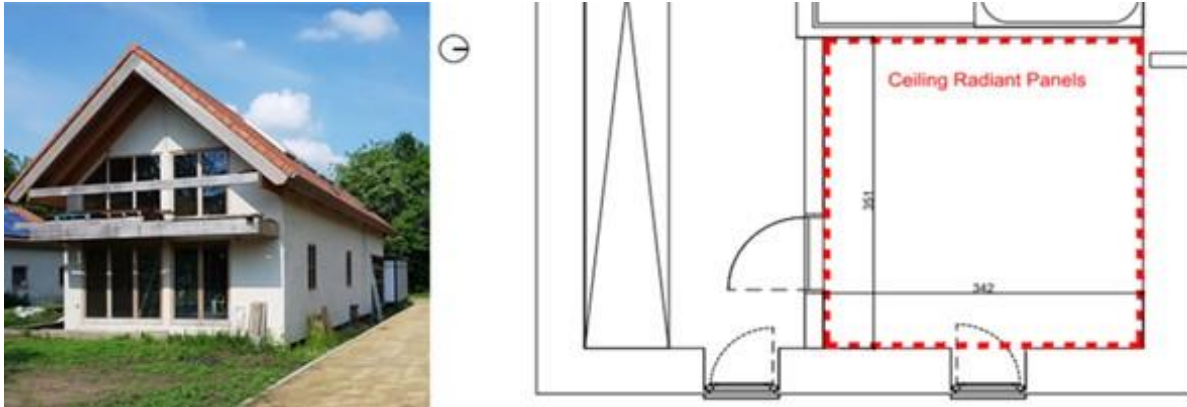


Ryc. 77. Sprzęt do monitorowania elewacji ETICS-podobnych

4.4. Dom ekologiczny Putte, Belgia

Instalacja paneli

W tym ekologicznym domu mieszkalnym zainstalowano radiacyjne panele sufitowe InnoWEE wraz z komercyjnym konkurentem (Ryc. 78), w celu uzyskania bezpośredniego porównania w trybie ogrzewania i chłodzenia.



Ryc. 78. Eko-dom i pomieszczenie gdzie zainstalowano panele

Wybrane rozwiązanie komercyjne wymagało dwóch paneli o wymiarach 1,2 m × 2,0 m. Aby zainstalować rozwiązanie InnoWEE (15 elementów, pogrupowanych po 5 w 3 rzędach), zbudowano niezależną konstrukcję wsporczą, która nie ma wpływu na konstrukcję drewnianą budynku. Prefabrykowane części zostały przymocowane za pomocą kotew. Wszystkie 8 metalowych profili zamocowano na stałe za pomocą śrub metrycznych. Belki zostały ustawione i przyspawane na całym obwodzie. Po ukończeniu konstrukcji metalowej zostały zainstalowane panele. Aby mieć wystarczająco dużo miejsca na podłączenie każdego panelu do obiegów wodnych, zachowano szczelinę 600 mm między panelami a sufitem. Po ustawieniu każdego panelu wykonano podłączenie wody.



Ryc. 79. Panele komercyjne (po lewej) i promienniki InnoWEE (po prawej) zainstalowane w suficie

Monitoring wydajności

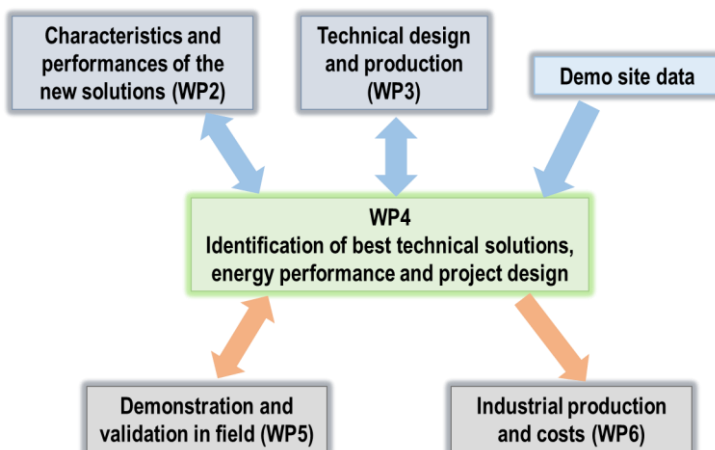
System monitorowania składa się z czujnika mikroklimatycznego (temperatura i wilgotność), licznika energii cieplnej (przepływomierz, temperatura na wlocie i wylocie) dla systemu promieniowania, i stacji pogodowej w ogrodzie na zewnątrz budynku. W sezonie zimowym i letnim prowadzono pomiary z termometrami kulowymi, aby obliczyć termo-higrometryczne warunki wewnętrzne (PMV i PPD).



Ryc. 80. Sprzęt monitorujący do pomiaru wydajności promieniujących paneli sufitowych

5. Modelowanie energii w budynku (BEM) i wirtualnych obiektach demonstracyjnych

Głównym celem do osiągnięcia w ramach zadania związanego z modelowaniem energii w budynku w projekcie InnoWEE była identyfikacja najlepszych rozwiązań dla łatwej instalacji i demontażu paneli na podstawie oceny architektonicznej i kosztów. W tym celu należy przeprowadzić odpowiednie gromadzenie danych i ustalenie ostatecznych wymagań realnych obiektów demonstracyjnych. Dane są wykorzystywane do optymalizacji rozwiązań poprzez modelowanie ich wydajności energetycznej w celu opracowania projektu dla każdego budynku demonstracyjnego. Działania zostały przeprowadzone w ramach 4. pakietu roboczego projektu i wymagały współpracy z innymi pakietami roboczymi, jak pokazano na Ryc. 81.



Ryc. 81. Korelacje między WP4 i innymi WP projektu InnoWEE

5.1. Ocena technologii i metod instalacji/demontażu oraz monitorowania paneli

Trzy rodzaje paneli geopolimerowych InnoWEE zostały zainstalowane w 4 budynkach demonstracyjnych. Każda instalacja została przeanalizowana i oceniona na podstawie czasu i kosztów niezbędnych do przeprowadzenia procesu.

FASADA ETICS	FASADA WENTYLOWANA	PANELE RADIACYJNE
<ul style="list-style-type: none"> Panel przyklejony na ścianie pionowej za pomocą zaprawy murarskiej Mocowanie łącznikami termokurczliwymi Uszczelnienie silikonowe do zakrycia połączeń między panelami Instalacja obróbek blacharskich 	<ul style="list-style-type: none"> System kotwienia ścian Nawiercanie paneli na miejscu Poziomowanie i mocowanie paneli Instalacja obróbek blacharskich 	<ul style="list-style-type: none"> Do montażu w systemach dla sufitów podwieszanych Nie wykonano instalacji testowej Można użyć konwencjonalnych elementów łączących i systemy kotwiących
		

Ryc. 82. Podsumowanie metodologii instalacji paneli InnoWEE

Poniżej przedstawiono ocenę instalacji, w której koszty odnoszą się wyłącznie do działań instalacyjnych. Inne czynniki wpływające na ostateczną cenę produktów to: miejsce instalacji, architektura budynku, stan zachowania.

W celu skutecznej oceny kosztów należy uwzględnić wszystkie czynniki wpływające na cenę końcową produktów:

- **Miejsce instalacji:** Każdy z krajów, w którym zostały zainstalowane panele, ma inną historię, tradycje, ścieżki rozwoju, aspekty polityczne i ekonomiczne. Z tego powodu nie jest możliwe wyrównanie kosztów dla każdego miejsca, ponieważ różnią się one w zależności od rozwoju każdego z nich.
- **Praca:** Ma różne koszty w zależności od kraju. W Belgii koszty pracy są wysokie, we Włoszech umiarkowane, a w Grecji i Rumunii bardzo niskie.
- **Geometria:** Geometria budynków różni się w zależności od przypadku. Niektóre budynki mają prostą geometrię, inne są bardziej złożone, niektóre mają zwisy lub wnęki, a jeszcze inne mają rogi.
- **Okna:** Niektóre budynki mają okna na fasadach, dlatego dużą wagę przykładają się do cięcia i mocowania paneli.

Panele ETICS-podobne

Panele ETICS-podobne zostały zainstalowane w dwóch rzeczywistych miejscach, po teście instalacji na wolnostojącej ścianie żelbetowej. Zalety paneli ETICS-podobnych zależą od kilku czynników i zmieniają się w zależności od typu budynku i miejsca jego ustawienia.

W przypadku paneli ETICS-podobnych zalety są związane z faktem, że istnieje tylko jedna faza instalacji, a sama instalacja jest prostsza niż w przypadku tradycyjnego systemu ETICS. Zmniejsza się ilość mocowań, a efekt estetyczny jest lepszy niż w przypadku tradycyjnego systemu ETICS.

Z przeprowadzonej instalacji wynika, że struktura budynków miała fundamentalną rolę pod względem czasu i kosztów. W Padwie, gdzie konstrukcja budynku była lekką konstrukcją wykonaną z płyt warstwowych, konieczne było wykorzystanie dużej ilości mocowań i prętów przejściowych, aby zapewnić bezpieczne mocowanie paneli. Ponadto, z tego powodu konieczne było rozprowadzenie masy klejącej w otworach wykonanych na pręcie przechodzącym, aby zapewnić izolację.

W Bukareszcie i w Voula instalacja była łatwiejsza niż w Padwie, ponieważ konstrukcje budynków były tradycyjnymi ścianami wykonanymi z pustaków lub betonu. Trudności związane były z geometrią budynków – obecnością okien i narożników.

Średni czas montażu na panel, biorąc pod uwagę środkową tendencję czasu montażu dla Padwy i Bukaresztu, można uznać za 5-10 minut na panel, czyli około 10-25 min/m². Dla tradycyjnego rozwiązania ETICS można przyjąć czas około 40 min/m².

W odniesieniu do kosztów instalacji, rozwiązanie InnoWEE kosztuje około 20-30 €/m² w zależności od kilku czynników. Tradycyjna cena może być brana pod uwagę jako około 30 €/m².

Biorąc pod uwagę również specyficzne czynniki instalacyjne, takie jak: rusztowania, koszty BHP, a nawet projekt, przewiduje się, że koszty rozwiązania InnoWEE wyniosą od 54,00 do 97,36 €/m².

Główne zalety rozwiązania InnoWEE w ujęciu czasowym w porównaniu z tradycyjnym rozwiązaniem są następujące:

- Prefabrykowane panele;
- Instalacja paneli wymaga tylko kilku kroków;
- Łatwa metoda instalacji;

- Panele ważą niewiele i są łatwe w obsłudze, ponieważ są małe.

Panele wentylowane

Panele wentylowane zostały zainstalowane w Padwie i w Voula, po próbie montażu na wolnostojącej ścianie żelbetowej w Padwie. Zalety płyt wentylowanych zależą od kilku czynników i zmieniają się w zależności od typu budynku i miejsca jego ustawienia.

W budynku w Padwie montaż paneli trwał dłużej niż w innych miejscach ze względu na istniejącą konstrukcję budynku. W rzeczywistości konstrukcja Domu Pilotażowego wykonana jest z lekkich ścian z płyt warstwowych, dlatego konieczne było zaprojektowanie i zamontowanie konstrukcji wtórnej, na której zawieszono zostały płyty. Ponadto wszystkie panele musiały być cięte na miejscu ręcznie.

Kluczową kwestią było zaprojektowanie i zamontowanie dodatkowej konstrukcji, niezbędnej ze względów konstrukcyjnych, co wiązało się z większą ilością czasu i wyższymi kosztami.

Drugim etapem, który wymagał więcej czasu, była faza ręcznego nawiercania paneli – operacja ta wymagała dużej dokładności.

Tak czy inaczej, główną zaletą rozwiązania InnoWEE, w porównaniu z tradycyjnym rozwiązaniem, jest posiadanie prefabrykowanych paneli o niewielkiej wadze i łatwej obsłudze ze względu na małe wymiary.

Z instalacji wykonanych w różnych miejscach pokazowych można było oszacować czas i poniesione koszty, tak aby można je było porównać z czasem i kosztami podobnych rozwiązań obecnych na rynku.

Oczywiście należy wziąć pod uwagę, że porównania dokonuje się biorąc pod uwagę fakt, że budynki miały różne charakterystyki, więc do ukończenia instalacji konieczne były różne kroki. Nawet koszty, jak już wspomniano, różnią się z kilku powodów: typologia budynku, metody instalacji, koszty pracy.

Na podstawie wymaganych wyników można określić średni czas montażu jednego panelu wynoszący 5-15 minut, co oznacza około 10-30 min/m². Czas potrzebny do wykonania tradycyjnej elewacji wentylowanej można uznać za około 20 min/m².

Odnosnie kosztu montażu, to wentylowane rozwiązanie InnoWEE kosztuje około 20-40 €/m² bez systemu kotew, który różni się znacznie w zależności od konstrukcji budynku. Tradycyjna cena fasady wentylowanej może być brana pod uwagę jako około 30 €/m².

Również w przypadku rozwiązań dotyczących paneli wentylowanych, w projekcie InnoWEE wzięto pod uwagę specyficzne czynniki montażowe, takie jak: rusztowania, koszty BHP, a nawet projekt, tak więc zakres kosztów dla paneli InnoWEE przewidziany jest na poziomie 54,00-97,36 €/m², bez systemu kotwiącego.

Główne zalety wentylowanego rozwiązania InnoWEE w ujęciu czasowym w porównaniu z rozwiązaniem tradycyjnym są następujące:

- Prefabrykowane panele;
- Łatwa metoda montażu;
- Panele ważą niewiele i są łatwe w obsłudze, ponieważ są małe.

Prototypowe panele

Prototypy paneli były monitorowane po instalacji w miejscach demonstracyjnych w celu oceny zewnętrznych warunków klimatycznych na produktach. Wnioski wyciągnięte z pęknięć w prototypach pozwalają na lepszą wydajność w prawdziwych demonstratorach.

W tej fazie projektu panele były monitorowane pod kątem potencjalnych uszkodzeń, awarii i zmian kolorów podczas ich użytkowania.

Wyniki monitorowania można podsumować następująco:

- **Pękanie i niszczenie materiałów**
 - panele ETICS-podobne: liczba pęknięć nieznacznie wzrosła;
 - wentylowane panele elewacyjne: powstały nowe pęknięcia, a poprzednie rozszerzyły się;
- **Wariacje kolorów**
 - panele ETICS-podobne: kolor naturalnych paneli pozostał niezmienny;

5.2. Modelowanie charakterystyki energetycznej różnych produktów

W ramach modelowania wydajności energetycznej symulowano różne scenariusze dla każdej demonstracji:

- Scenariusz 0: aktualne warunki budynków demonstracyjnych,
- Scenariusz 1: zachowanie wersji demonstracyjnych po wdrożeniu rozwiązań InnoWEE,
- Scenariusz 2: optymalizacja i analiza wrażliwości.

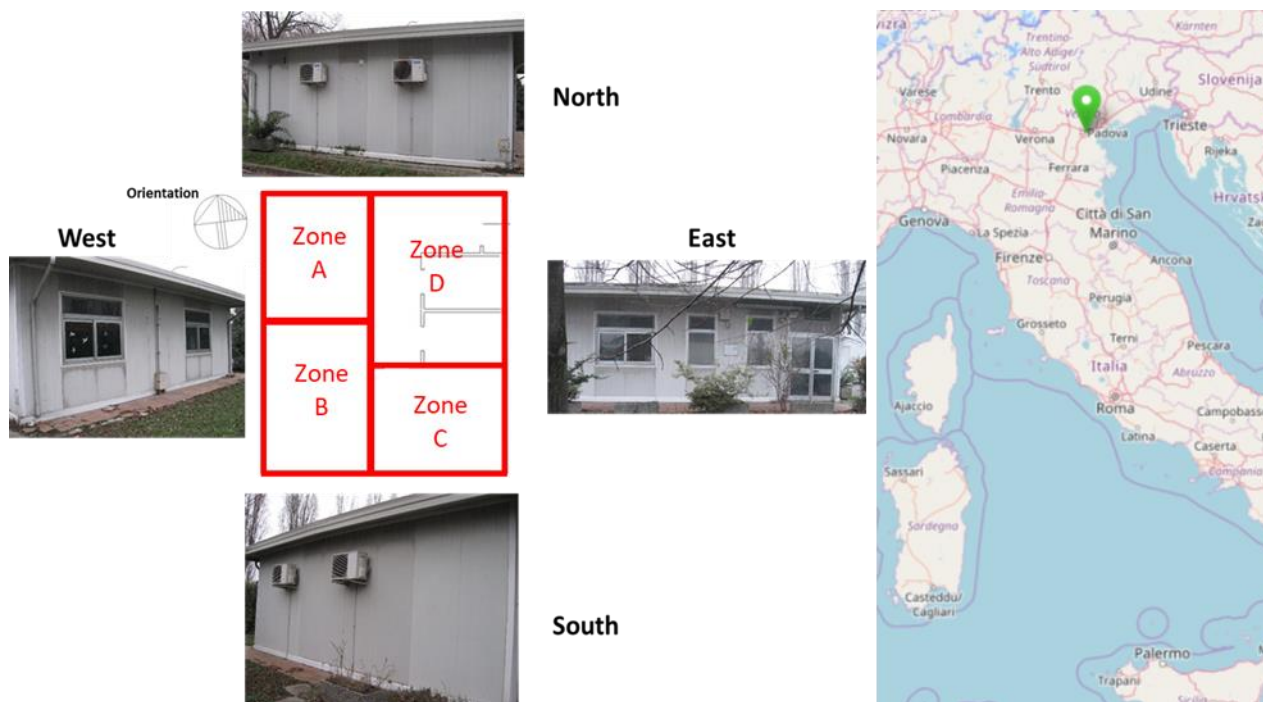
Tabela 6. Podsumowanie informacji o realnych budynkach demo

Typ	Opis	Lokalizacja	Rozwiązanie InnoWEE
Pilotaż	Pilotaż (Dom pilotażowy CNR)	Włochy (Padowa)	Wentylowana elewacja Sufit promieniujący ETICS-podobne
Historyczny	Stary ratusz w gminie Voula	Grecja (Voula)	ETICS-podobne Wentylowana elewacja
Nowy	Eko-dom mieszkalny, Putte-Mechelen	Belgia (Putte)	Sufit promieniujący
Istniejący	Dom opieki Don Orione, Voluntari	Rumunia (Bukareszt)	ETICS-podobne

Włoski budynek pilotażowy

Dom Pilotażowy jest budynkiem znajdującym się wewnątrz Obszaru Narodowej Rady Badań Naukowych w Padwie, we Włoszech. Został zbudowany około 1993 roku jako jednopiętrowy budynek biurowy, a konstrukcja jest wykonana z prefabrykowanych ścian. Dom Pilotażowy był wykorzystywany jako biuro do 2016 roku, kiedy to osoby korzystające z konstrukcji zostały przeniesione w inne miejsca. Plan budynku jest prawie kwadratowy, o powierzchni nieco większej niż 70 m² i orientacji zbliżonej do północ-południe. Budynek składa się z trzech głównych pomieszczeń, małego pokoju, łazienki i korytarza o łącznej kubaturze blisko 200 m³.

Oryginalny plan budynku składa się z trzech głównych pomieszczeń (strefy A, B, C) oraz powierzchni obejmującej mały pokój, łazienkę i korytarz (strefa D). Plan budynku, ze wskazaniem pomieszczeń, pokazany jest na Ryc. 83.

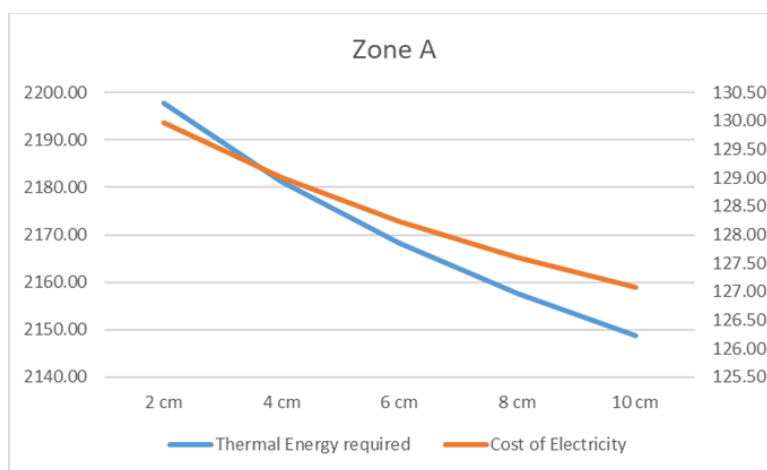


Ryc. 83. Sufity obiektu pilotażowego, w których zainstalowano różne panele

Strefa A – panele ETICS-podobne: zmniejszenie zapotrzebowania na energię o 10% w sezonie grzewczym i 15% w sezonie chłodniczym.

Strefa B – fasada wentylowana: redukcja o 1% w sezonie zimowym i letnim, dzięki dobrej przepuszczalności istniejącej ściany.

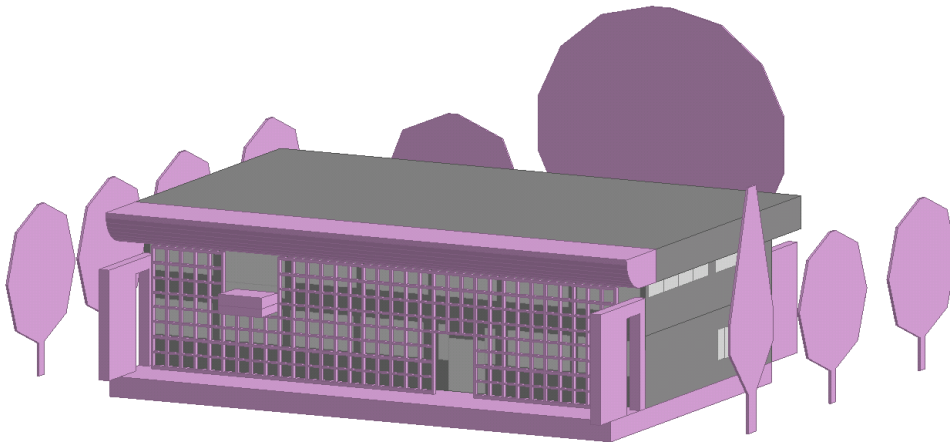
Strefa C – sufity promieniujące: zainstalowane panele wystarczają do ogrzania całego pomieszczenia do wymaganej temperatury 20°C w sezonie zimowym i do 26°C wymaganych w sezonie letnim, zwiększając wydajność w stosunku do wcześniej zainstalowanego klimakonwektora.



Ryc. 84. Redukcja zużycia energii zmieniają grubość EPS

Grecki budynek demonstracyjny

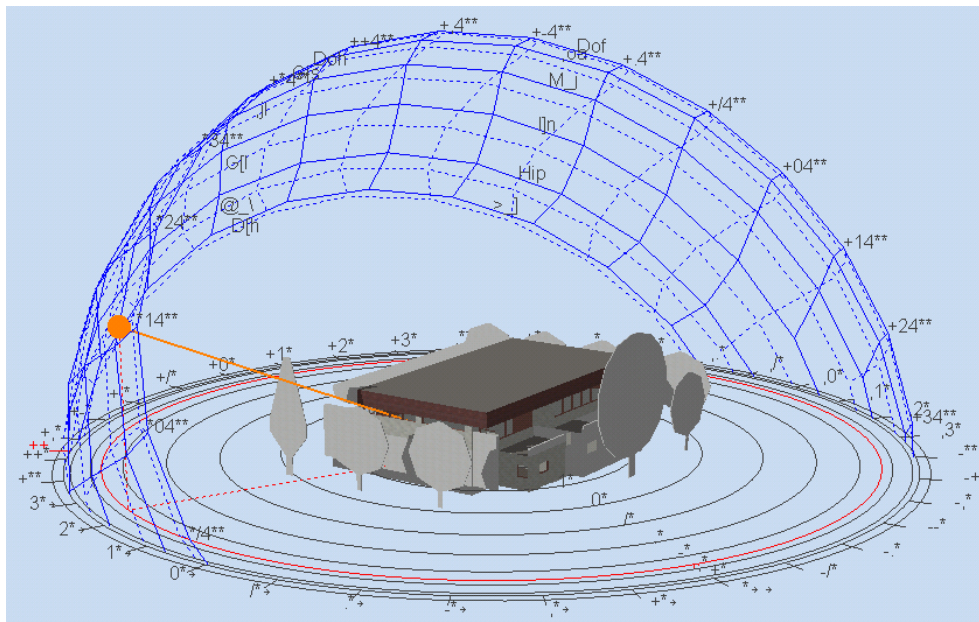
Ratusz Vouliagmeni jest historycznym budynkiem położonym w parku osiedla mieszkaniowego w gminie Voula-Vouliagmeni w Grecji. Został on zaprojektowany pod koniec lat sześćdziesiątych i składa się z dwóch pięter i częściowej piwnicy. Wszystkie szczegóły konstrukcyjne, poziomy aktywności, zyski wewnętrzne, dane pogodowe i projekt HVAC zostały zastosowane do symulacji.



Ryc. 85. Model budynku – Ratusz w Voula



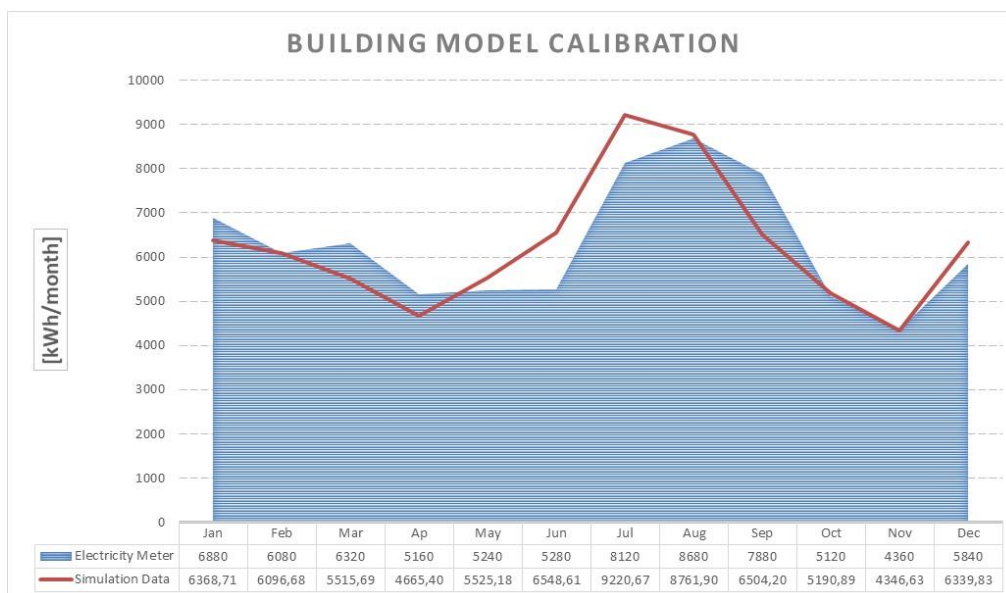
Ryc. 86. Istniejący ratusz w Voula



Ryc. 87 Model budynku Ścieżka Słońca – Ratusz w Voula

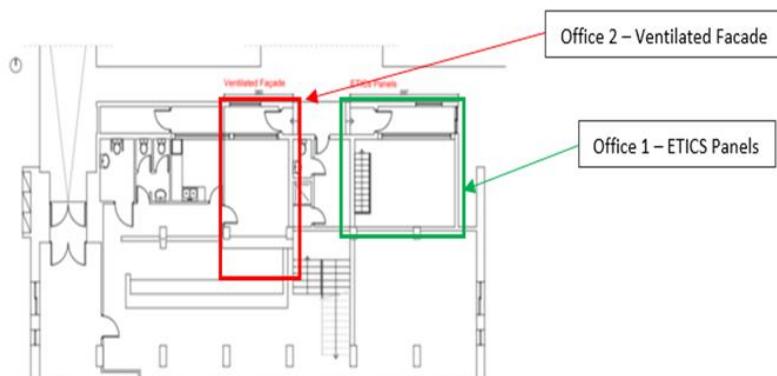
Zgodnie z metodologią IPMVP, symulacja budynku musi być dostosowana, "skalibrowana", tak aby jej wyniki odpowiadały zarówno danym o zapotrzebowaniu, jak i zużyciu pochodzącym z miesięcznych rachunków za media w ramach dopuszczalnych tolerancji. Powszechnie wiadomo, że

wzorce zachowań mają znaczący wpływ na rzeczywiste zużycie. Dlatego też istnieje błąd procentowy pomiędzy danymi mierzonymi a wynikami symulacji, które opierają się na wskaźnikach predykcyjnych. Zastosowano szereg procedur mających na celu zniwelowanie tej luki w zakresie właściwości użytkowych pomiędzy dostarczonymi rachunkami za energię elektryczną a modelem budynku. Wyniki kalibracji przedstawiono na wykresie poniżej (Ryc. 88).



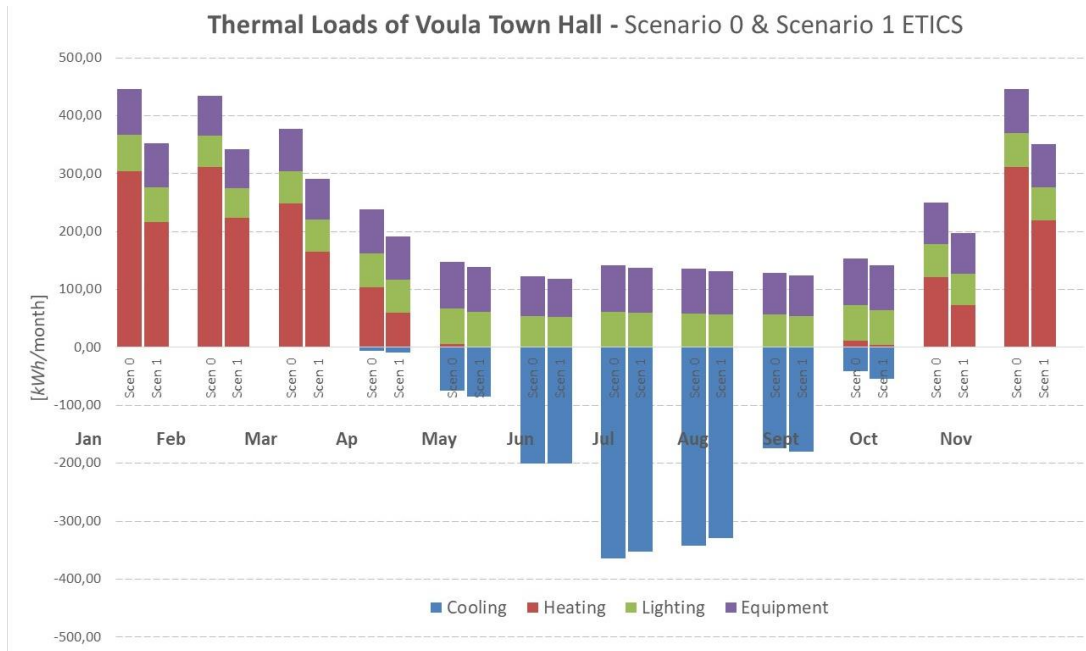
Ryc. 88. Kalibracja modelu budynku z danymi pomiarowymi

Zarówno panele ETICS-podobne, jak i wentylowana elewacja są zintegrowane z istniejącym modelem budynku w celu uzyskania oszczędności energii wynikających z tych efektów. Office 1 i Office 2 na parterze są podane jako wybrane strefy do przeprowadzenia analizy.



Ryc. 89. Pomieszczenia w budynku demonstracyjnym z panelami ETICS-podobnymi i wentylowanymi na ścianach zewnętrznych

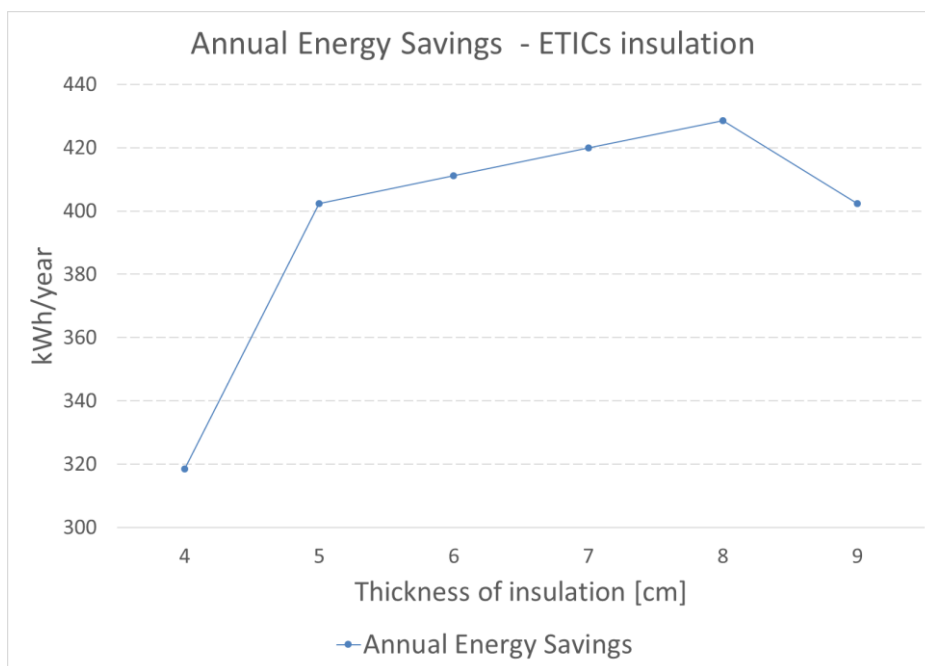
Wyniki porównania stanu istniejącego budynku z budynkiem remontowanym pokazują całkowitą roczną poprawę charakterystyki energetycznej obu rozwiązań. Roczna symulacja dynamiczna pokazuje oszczędność energii na poziomie 10,41% kWh/rok dla Office 1 i 2,44% kWh/rok dla Office 2.



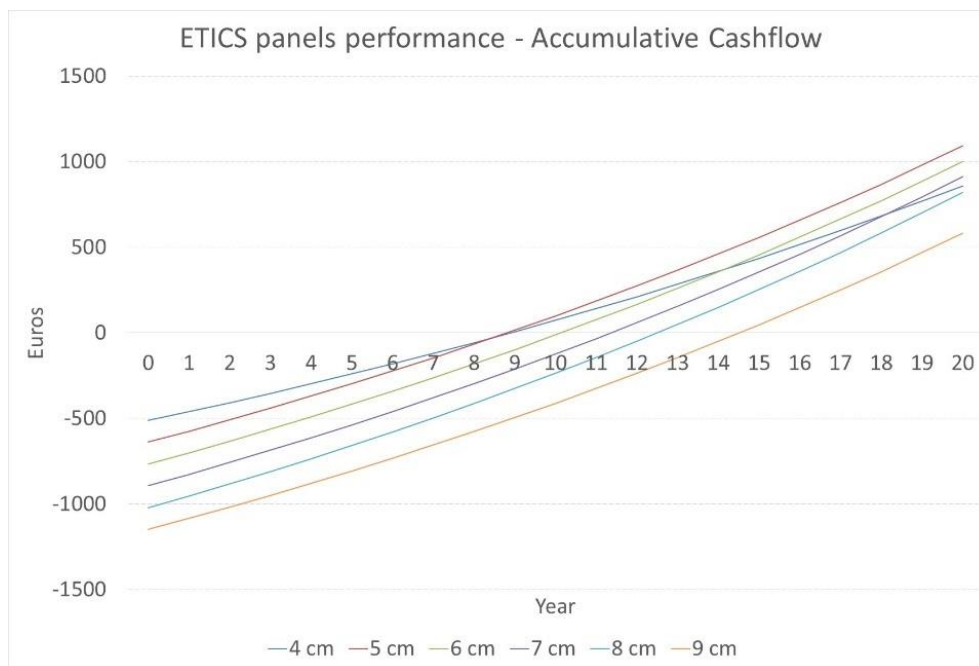
Ryc. 90. Obciążenia cieplne ratusza Voula przed i po izolacji ETICS

Ponadto obliczono roczne oszczędności energii przy zastosowaniu różnych rodzajów izolacji ETICS-podobnych, w zależności od grubości warstwy izolacyjnej. Zgodnie z wynikami stwierdzono, że:

- Zużycie energii elektrycznej może wzrosnąć przy ponad 8 cm izolacji, ze względu na wzrost zapotrzebowania na chłodzenie
- 8 cm izolacji da zwrot za około trzynaście lat, biorąc pod uwagę podane ceny. Analiza ekonomiczna rozwiązań zakłada:
 - Koszt energii elektrycznej: 0,16 €/kWh,
 - Inflacja w zakresie kosztów energii elektrycznej: 3%.

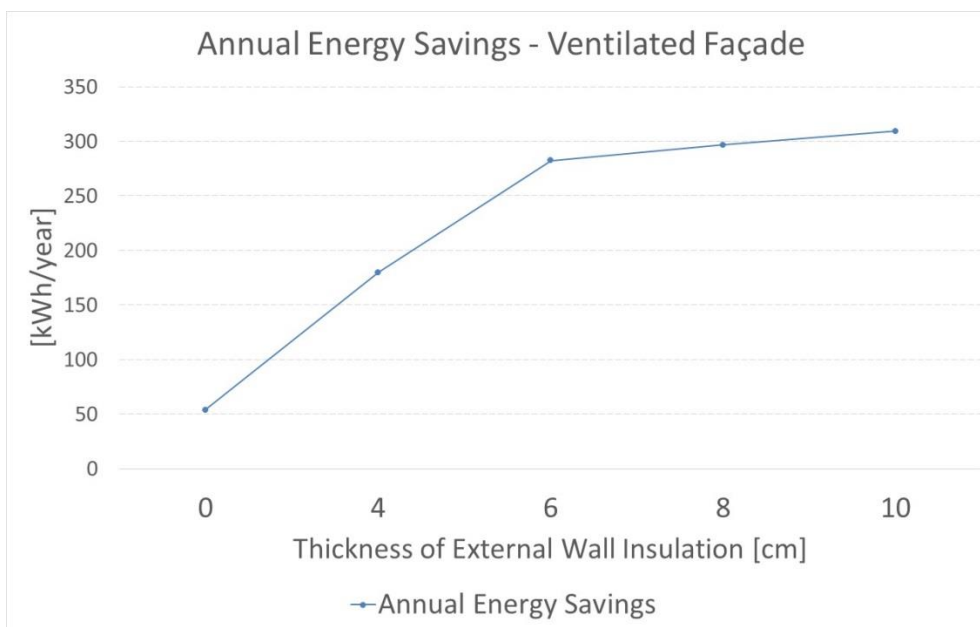


Ryc. 91. Roczne oszczędności energii w zależności od grubości EPS w ETICS-podobnych panelach InnoWEE w greckim budynku demonstracyjnym



Ryc. 92. Oszczędność kosztów w zależności od grubości EPS w ETICS-podobnych panelach InnoWEE w greckim demo

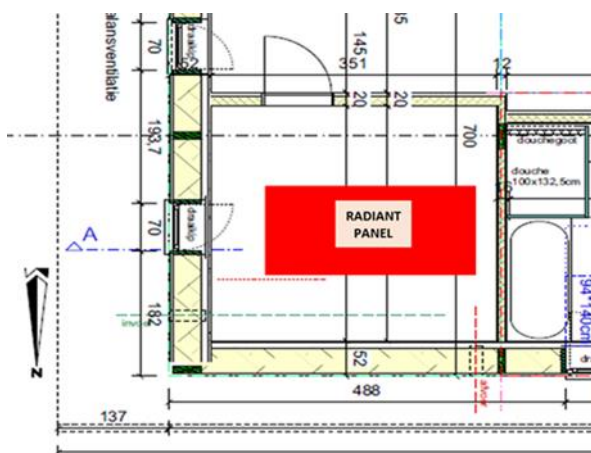
Odnośnie wentylowanej elewacji, nie ma rozsądnego okresu zwrotu, ponieważ pierwsza inwestycja kapitałowa jest znacznie wyższa w porównaniu z oszczędnościami energii. Jak opisano powyżej, w celu uniknięcia kondensacji pary wodnej, wraz z wentylowaną fasadą zaleca się wykonanie izolacji ścian zewnętrznych. Następna linia wykresu przedstawia potencjalne oszczędności energii związane z grubością tej izolacji $\lambda = 0,038 \text{ W/mK}$. Po dodaniu izolacji o grubości 4 i 6 cm następuje istotne zmniejszenie zużycia energii. Wzrasta ono jednak nieznacznie z 6 do 10 cm.



Ryc. 93. Wentylowana fasada wraz z izolacją ścian zewnętrznych

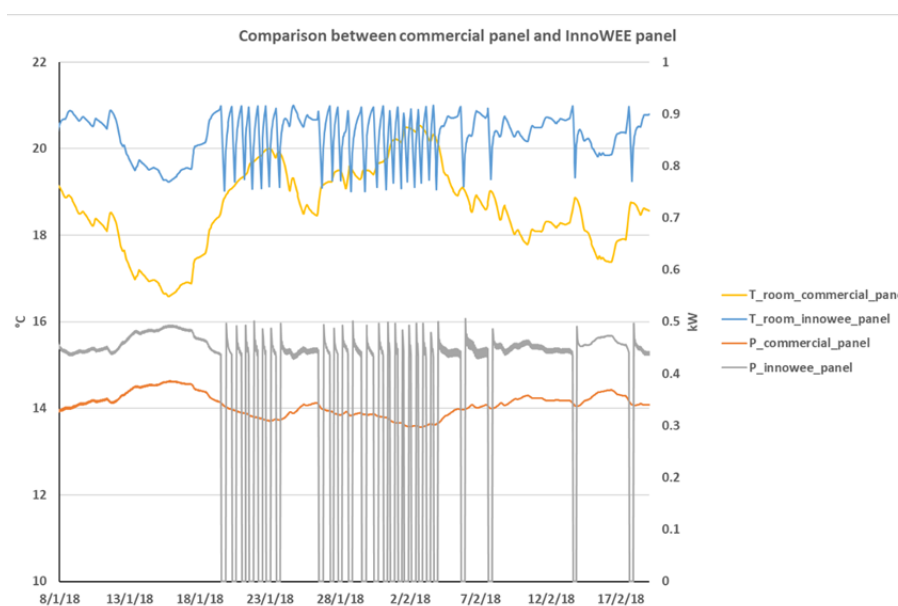
Belgijski budynek demonstracyjny

W Eco-House porównano komercyjne sufitowe panele promieniujące z sufitowymi panelami InnoWEE.



Ryc. 94. Analizowane pomieszczenie z panelami promieniującymi

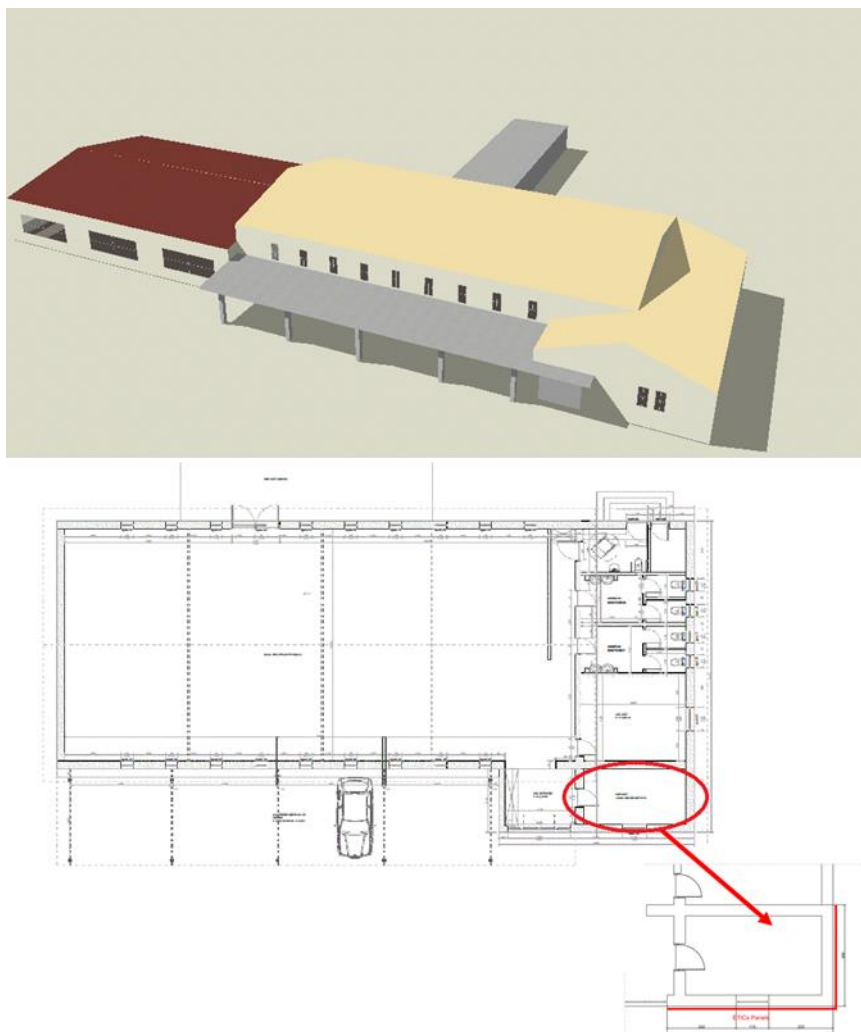
Biorąc pod uwagę, że budowa tego miejsca demonstracyjnego została niedawno zakończona, wyniki symulacji zostaną zweryfikowane po okresie próbnym na miejscu. Termostat w analizowanym pomieszczeniu został ustawiony na 20°C dla obu przypadków, a z poniższego wykresu (Ryc. 95) wynika natychmiastowa poprawa charakterystyki energetycznej.



Ryc. 95. Wartości godzinowe dla okresu grzewczego temperatury pokojowej przy użyciu paneli komercyjnych lub paneli InnoWEE i mocy dostarczonej przez te panele.

Rumuński budynek demonstracyjny

Budynek demonstracyjny znajdujący się w Rumunii jest wielofunkcyjnym pomieszczeniem w domu opieki dla osób starszych i sierot z niepełnosprawnością fizyczną i umysłową. Jednopiętrowy budynek ma kształt prostokąta i prostą strukturę parteru, z konstrukcją wykonaną z napiętych belek i betonowych filarów. W rumuńskim demo, na dwóch zewnętrznych ścianach pomieszczenia magazynowego budynków zainstalowano panele ETICS-podobne.



Ryc. 96. Rumuński budynek demo z magazynem

Jeśli chodzi o system HVAC, na miejscu nie ma systemu ogrzewania lub chłodzenia, a obciążenie jest zbyt małe. W związku z tym nie istnieje rzeczywiste zużycie energii, a jedynie zapotrzebowanie. Ponieważ nie są dostępne dane z liczników, nie jest możliwa kalibracja modelu budynku jak w poprzednich przypadkach. Jednakże porównanie zapotrzebowania na ciepło ze standardowym budynkiem o podobnych cechach¹ w tym samym scenariuszu pokazuje, że wartość ta mieści się w zakresie ważności.

Wdrożenie ETICS daje w rezultacie 20% całkowitych oszczędności energii, jak widać w poniższej tabeli.

Tabela 7. Porównanie zapotrzebowania na ciepło pomieszczenia magazynowego przed (scenariusz 0) i po (scenariusz 2) instalacji paneli InnoWEE

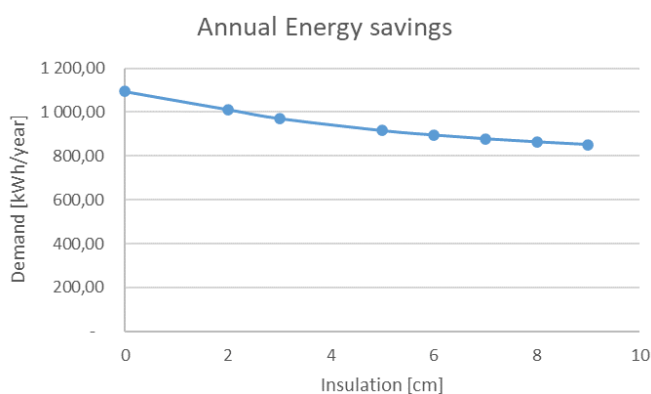
Miesiąc	Istniejący magazyn – scenariusz 0	Magazyn z zainstalowanymi panelami – scenariusz 2
	Ogrzewania [kWh]	Ogrzewanie [kWh]
Styczeń	375,09	296,80
Luty	222,16	173,97
Marzec	63,08	41,61

¹ <http://webtool.building-typology.eu/#bm>

Kwiecień	1,52	1,01
Maj	0	0
Czerwiec	0	0
Lipiec	0	0
Sierpień	0	0
Wrzesień	0	0
Październik	12,22	7,67
Listopad	118,16	86,28
Grudzień	302,69	238,25
RAZEM [kWh/yr]	1 094,92	845,59
RAZEM [kWh/m ² yr]	49,77	38,43

W celu pełnego zbadania potencjału ulepszanego projektu, oceniono instalację paneli ETICS-podobnych o różnej grubości izolacji. Projekt musi być zoptymalizowany pod względem realistycznych i ekonomicznych parametrów, osiągając kompromis pomiędzy kosztami i charakterystyką energetyczną. Projekt opiera się na poniższych parametrach:

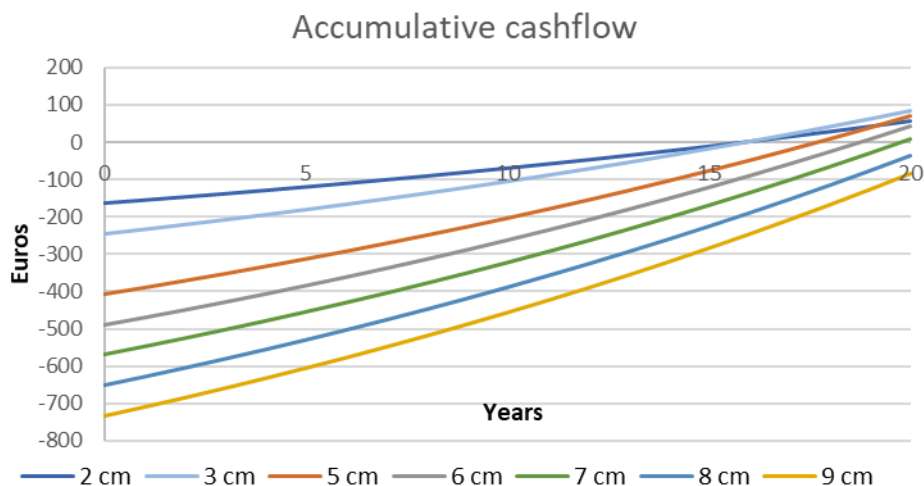
- Redukcja zapotrzebowania na energię
- Optymalizacja grubości izolacji
- Aspekty ekonomiczne, koszty inwestycji.



Grubość (cm)	Zapotrzebowanie energetyczne (kWh/rok)	Oszczędności
0	1094,92	0,00%
2	1011,88	7,58%
3	971	11,32%
5	915,47	16,39%
6	895,24	18,24%
7	877,89	19,82%
8	863,87	21,10%
9	851,31	22,25%

Ryc. 97. Całkowita roczna oszczędność energii przy różnych grubościach izolacji

Pierwszy wykres powyżej przedstawia roczne oszczędności energii przy różnej grubości materiału izolacyjnego. Wyraźnie widać, że wraz ze wzrostem grubości zmniejsza się zapotrzebowanie na energię. Redukcja ta wynosi od 7,58% dla 2 cm do 22,25% dla 9 cm. Jednak zarówno z wykresu, jak i z tabeli wynika, że szacunkowy procent oszczędności energii staje się coraz mniej zauważalny powyżej 6 cm izolacji. W rzeczywistości, oszczędności te rosną nieznacznie o 2,43% pomiędzy 7 cm a 9 cm.



Ryc. 98. Skumulowane przepływy pieniężne dla rumuńskiego budynku demo

W odniesieniu do skumulowanych przepływów pieniężnych, można stwierdzić, że instalacja ETICS zwraca się w ciągu 16 lat, gdy zainstalowane są 2 cm izolacji. Niemniej jednak, nie oczekuje się zwrotu powyżej 7 cm.

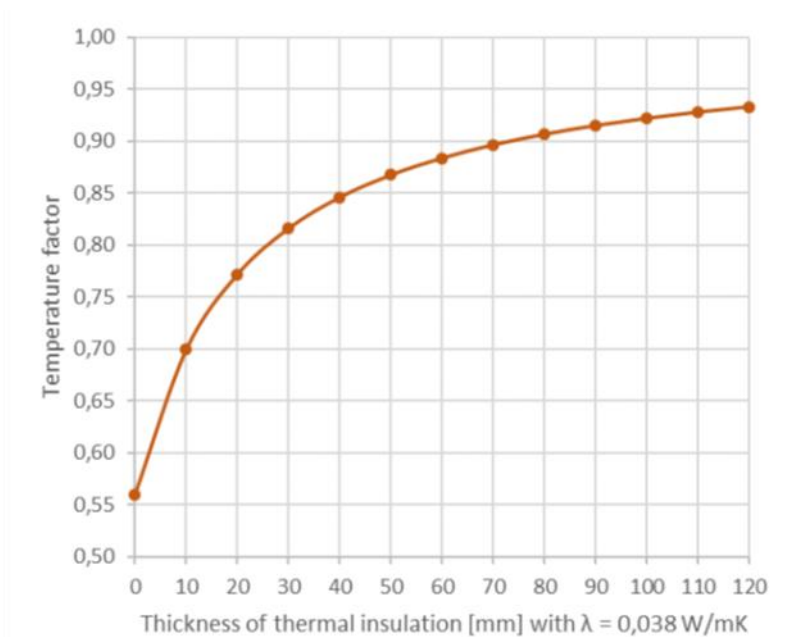
Analizy te opierają się na następujących założeniach:

- Koszt energii elektrycznej: 0,099 €/kWh,
- Inflacja w zakresie kosztów energii elektrycznej: 3%.

5.3. Ocena higrotermiczna

Uprozczone jednowymiarowe obliczenia przepływu ciepła nie uwzględniają wpływu mostków termicznych, takich jak wsporniki systemu InnoWEE. W celu dokładniejszej oceny właściwości termicznych oraz ryzyka kondensacji powierzchniowej lub rozwoju pleśni, wykonano trójwymiarowe modelowanie numeryczne. Oceniono szereg różnych grubości izolacji termicznej, przy czym izolacja ta została umieszczona na zewnętrznej powierzchni oryginalnej ściany skierowanej w stronę wentylowanej pustki.

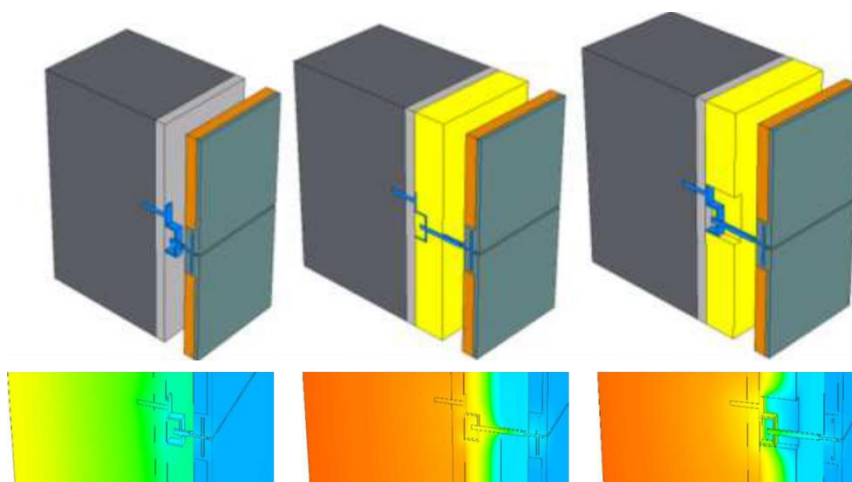
Współczynnik temperatury (zdefiniowany w ISO 13788) został użyty jako metryka do oceny ryzyka kondensacji powierzchniowej lub rozwoju pleśni. Temperatura powierzchni wewnętrznej mieści się w skali od 0 (temperatura powietrza zewnętrznego) do 1 (temperatura powietrza wewnętrznego) w stanie ustalonym, przy czym niższe wartości wskazują na większe ryzyko kondensacji. Wartości progowe ryzyka zależą od klimatu zewnętrznego i warunków otoczenia wewnątrz pomieszczeń. Jako podejście konserwatywne wybrano najbardziej wrażliwy budynek demonstracyjny, którym jest demo w Voula, z progiem 0,62 jako najgorszym scenariuszem. Wszystkie przypadki, w których zastosowano izolację, mają współczynnik temperaturowy powyżej 0,80 i dlatego są uważane za bezpieczne.



ISO 13788 (A.1)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Temperature [°C]	20.0	20.0	20.0	20.0	23.9	25.7	27.2	26.5	24.4	22.0	20.0	20.0
Saturation vap. pressure [Pa]	2337	2337	2337	2337	2964	3300	3605	3460	3045	2642	2337	2337
Relative humidity [%]	52.3	54.5	57.4	62.5	67.8	71.4	74.4	73.0	68.7	64.0	57.9	54.4
Vapour pressure [Pa]	1222	1274	1341	1461	2010	2356	2682	2526	2092	1691	1353	1271
Critical relative humidity [%]	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Critical vapour pressure [Pa]	1528	1592	1677	1826	2512	2946	3353	3157	2615	2114	1691	1589
Min. Surf. temperature [°C]	13.3	13.9	14.7	16.1	21.2	23.8	26.0	25.0	21.8	18.4	14.9	13.9
Min. temperature factor [-]	0.62	0.61	0.58	0.48	0.55	0.56	0.56	0.56	0.55	0.55	0.58	0.61

Ryc. 99. Ocena higrotermiczna EN ISO 13788:2012

Odnosnie właściwości termicznych, bez szczelin powietrznych wokół wspornika podpierającego, mostek termiczny powoduje wzrost wartości współczynnika U o 8-14%, co jest uważane za akceptowalne. Jednak przy lukach powietrznych wokół kotew wartość współczynnika U wzrasta o 25-70%, co powoduje znaczne obniżenie ogólnej charakterystyki cieplnej. Dlatego zaleca się stosowanie elastycznych materiałów izolacyjnych i owijanie ich ostrożnie wokół wsporników, aby zapobiec powstawaniu takich szczelin powietrznych.



Ryc. 100. Elewacja wentylowana: bez izolacji (po lewej), izolacja 60 mm bez szczeliny wokół kotwy (pośrodku), izolacja 60 mm ze szczeliną powietrzną w występie kotwy (po prawej)

5.4. Osiągnięcia InnoWEE i projekt dla każdego obiektu demo

W poniższych tabelach przedstawiono osiągnięcia InnoWEE w zakresie oszczędności energii i emisji CO₂.

Tabela 8. Osiągnięcia energetyczne InnoWEE

Scenariusz	Odniesienie (energia końcowa)		Renowacje INNOWEE			
	Zapotrzebowanie na ciepło [kWh/m ² ·yr]	Zapotrzebowanie na chłód [kWh/m ² ·yr]	Zapotrzebowanie na ciepło [kWh/m ² ·yr]	Redukcja [%]	Zapotrzebowanie na chłód [kWh/m ² ·yr]	Redukcja [%]
Włochy (ETICS, zone A)	45,77	0,8	40,95	11,8	0,69	18,8
Włochy (VF, zone B)	41,62	1,03	41,08	1,13	1,02	0,97
Grecja (ETICS)	52,75	40,39	35,83	32	40,85	-1,1
Grecja (VF)	42,99	40,73	39,32	8,5	41,18	-1,1
Rumunia	49,77	0	39,90	20	0	-

Tabela 9. Osiągnięcia InnoWEE w redukcji CO₂

Scenariusz	Odniesienie (energia końcowa)		Renowacje INNOWEE			
	Zapotrzebowanie na ciepło [kWh/m ² ·yr]	Zapotrzebowanie na chłód [kWh/m ² ·yr]	Zapotrzebowanie na ciepło [kWh/m ² ·yr]	Redukcja [%]	Zapotrzebowanie na chłód [kWh/m ² ·yr]	Redukcja [%]
Włochy (ETICS)	339,45	6,08	303,73	10,5	5,14	15
Grecja (ETICS)	1088,27	920,77	739,76	32	928,73	0,86
Grecja (VF)	626,61	657,92	573,20	8,5	664,07	-0,93
Rumunia	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

W celu zdefiniowania konkretnego projektu rehabilitacji dla każdego obiektu demo potrzebna jest walidacja nowych produktów w rzeczywistej skali. W tym celu przeprowadzono analizę cech charakterystycznych każdego z miejsc demonstracyjnych, aby zrozumieć konkretne szczegóły opracowania projektów instalacyjnych paneli. Zostało to wykonane na podstawie wcześniej zebranych informacji, w szczególności:

- lokalizacja geograficzna,
- ryzyko sejsmiczne,
- narażenie,
- użycie,
- urządzenia instalacyjne.

6. Analiza cyklu życia – LCA

Badacze, decydenci i firmy coraz bardziej koncentrują się na zmniejszaniu wpływu na środowisko budynków i materiałów w nich wdrażanych. Ocena cyklu życia (LCA) to znormalizowana technika uwzględniająca wpływ na środowisko związany z różnymi etapami cyklu życia produktu. Etapy te obejmują wydobywanie surowca, dostarczenie wydobytych zasobów do fabryki, przetwarzanie materiału i wytworzenie produktu, wykorzystanie produktu, naprawę i konserwację, a na koniec ponowne użycie produktu, recykling lub ostateczną utylizację, uwzględniając korzyści z produktu po upływie okresu jego użytkowania, w kolejnym systemie produkcji (ISO14040:2006, ISO14044:2006, EN 15804). W dziedzinie zarządzania CDW zastosowano LCA w celu zbadania wydajności ogólnych strategii zarządzania CDW i zakładów recyklingu CDW, porównania naturalnego materiału z materiałem pochodzącym z recyklingu CDW, analizy różnych scenariuszy wycofania z eksploatacji budynków i elementów konstrukcyjnych oraz oceny produkcji energii elektrycznej z CDW (Bovea and Powell, 2016).

LCA składa się z czterech różnych faz:

- **faza definiowania celu i zakresu**, która określa kontekst badania poprzez określenie jednostki funkcjonalnej, granic systemu oraz wszelkich założeń i ograniczeń badania
- **faza analizy inwentaryzacji**, która tworzy spis przepływów wejściowych i wyjściowych do i z badanego systemu, takich jak wkłady wody, energii i surowców oraz wyjścia (emisji) do powietrza, ziemi i wody
- **faza oceny wpływu**, która ma na celu ocenę znaczenia i wielkości potencjalnych oddziaływań na środowisko na podstawie wyników analizy inwentaryzacji
- **faza interpretacji**, w której wnioski z wyników fazy analizy inwentaryzacji i/lub fazy oceny wpływu są podsumowane i ocenione w odniesieniu do określonego celu i zakresu badania.

Ocena cyklu życia jako metoda ma pewne ograniczenia, ale może być wykorzystana jako skuteczne narzędzie do zdefiniowania niektórych powszechnych trendów. W przypadku **materiałów pochodzących z recyklingu CDW**, LCA w naszym badaniu koncentrowało się na:

- Szczegółowemu modelowaniu w górę łańcucha dostaw,
- Dobrej definicji scenariuszy,
- Radzeniu sobie z metodologią dla różnych scenariuszy wycofania z eksploatacji,
- Określeniu odpowiednich granic systemu.

6.1. Metodologia LCA

Celem analizy LCA w ramach projektu InnoWEE jest zbadanie wpływu na środowisko związanego z różnymi etapami cyklu życia prefabrykowanych paneli geopolimerycznych wykonanych z dużych frakcji odpadów budowlanych i rozbiórkowych (CDW). Rozważono trzy różne prefabrykowane panele geopolimerowe: (i) panel ETICS-podobny, (ii) panel okładzinowy do wentylowanych fasad i (iii) panel promieniujący.

Analiza oparta jest na deklarowanej jednostce rozważanego produktu. Zastosowana jednostka to 1 m² rozważanego prefabrykowanego panelu geopolimerowego, tj. panelu elewacyjnego ETICS-podobnego, panelu okładzinowego dla wentylowanych fasad i panelu promieniującego.

Niniejsze badanie LCA opiera się na zasadzie „od kołyski po grób” i uwzględnia cały cykl życia prefabrykowanych paneli geopolimerowych, tj. etap produktu (A1-A3), etap procesu budowy (A4-

A5), etap użytkowania (B1-B7), etap zakończenia życia (C1-C4) oraz korzyści i obciążenia poza granicami systemu (D). Moduły (A1-D) są zgodne z definicją w EN 15804.

Etap produktu obejmuje (i) produkcję materiałów, w tym wydobycie surowców, (ii) transport materiałów do zakładu produkcji paneli, i (iii) produkcję prefabrykowanych paneli geopolimerowych, która obejmuje mieszanie materiałów składowych, odlewanie, utwardzanie, rozformowywanie, suszenie, montaż, a na koniec pakowanie i przechowywanie wyprodukowanych prefabrykowanych paneli geopolimerowych. Uwzględnia się również zużycie energii (np. mieszanie, odlewanie, utwardzanie, transport wewnątrz zakładu itp.) oraz zużycie wody (np. woda do czyszczenia itp.) w całym procesie produkcyjnym.

Etap procesu budowy obejmuje transport paneli na plac budowy (tj. moduł A4) i montaż paneli (tj. moduł A5). Wybrano odległość transportu 200 km, a wszystkie materiały pomocnicze użyte w procesie instalacji (np. łączniki, zaprawy, kotwy itp.) zostały uwzględnione w modelu LCA.

Po zainstalowaniu paneli potrzeba konserwacji lub remontu jest na ogół bardzo ograniczona, a zużycie energii i wody nie jest konieczne. Dlatego nie ma żadnych wpływów związanych z **etapem użytkowania** prefabrykowanych paneli geopolimerowych (oddziaływania są odcięte, zgodnie z warunkami określonymi w EN 15804).

Zastosowana koncepcja **etapu wycofania z eksploatacji** zakłada, że geopolimerowa część panelu mogłaby zostać poddana recyklingowi i użyta jako zamiennik pierwotnego kruszywa w podłożu drogowym, natomiast części panelu nie podlegające recyklingowi (np. EPS itp.) byłyby utylizowane na składowisku. Nie ma żadnych skutków związanych z rozbiórką paneli (modułem C1), ponieważ wyburzenie odbywa się ręcznie. Części niepodlegające recyklingowi (np. EPS itp.) zostały przetransportowane na składowisko odpadów (moduł C4), przy odległości transportu ustalonej na 50 km. Poziom recyklingu geopolimeru został ustalony na 70%, co oznacza, że 70% geopolimeru uzyskanego po procesie rozbiórki zostało przetransportowane do zakładu recyklingu (modułu C3), natomiast 30% zostało przetransportowane na składowisko (moduł C4). Odległość transportu do zakładu recyklingu (moduł C2) została również ustalona na 50 km. W zakładzie recyklingu geopolimer kruszy się do wymaganej wielkości cząstek (moduł C3).

Po osiągnięciu stanu zniesienia statusu odpadu przyjmuje się, że zmiażdżony HDG będzie wykorzystywany w podłożu drogowym, co pozwoliłoby uniknąć wykorzystania pierwotnego materiału do budowy dróg. Dlatego **korzyści i obciążenia poza etapem granicznym systemu** (moduł D) obejmują wpływy transportu na plac budowy drogi oraz korzyści wynikające z wymiany pierwotnego materiału w budowie drogi. Odległość transportu do budowy drogi została ustalona na 50 km. Materiał wtórny (poddany recyklingowi geopolimer) nie ma tej samej jakości co materiał pierwotny. Dlatego zastosowano współczynnik korekcji wartości w celu uwzględnienia różnicy w jakości materiału. Dla współczynnika korekcji zastosowano wartość 0,5, co oznacza, że obliczone korzyści wynikające z zastąpienia materiału pierwotnego są mnożone przez współczynnik korekcji o wartości 0,5.

6.2. Inwentaryzacja cyklu życia (LCI)

Oprogramowanie do modelowania GaBi zostało wykorzystane do przeprowadzenia badania LCA (thinkstep, 2019b), przy czym GaBi jest jednym z najczęściej używanych programów w dziedzinie modelowania LCA (Herrmann i Moltesen, 2015). Podejście do modelowania LCA jest kombinacją danych zawartych w inwentarzu bazy danych i indywidualnym modelowaniu upstream. Wydobycie i przetwarzanie surowców, przetwarzanie materiału wtórnego, dostawa materiałów oraz produkcja

i dostawa energii i wody zostały modelowane na podstawie danych inwentaryzacyjnych podanych w bazie danych GaBi Professional. Jednak trzy materiały wejściowe nie są łatwo dostępne w bazie danych GaBi Professional: metakaolin, krzemian potasu i CDW, co odzwierciedla faktyczny skład zastosowanych CDW. Dlatego zostały one modelowane osobno w poprzedzającym procesie modelowania LCA.

Modelowanie LCA „w górę” (upstream):

- metakaolin: produkcja oparta na kruszeniu kaolinu w młynku, a następnie suszeniu pokruszonego kaolinu i kalcynowaniu pokruszonego kaolinu do metakaolinu w wielkim piecu
 - główne dane wejściowe do wcześniejszego modelu upstream LCA: kaolin i zapotrzebowanie na energię
- krzemian potasu: hydrotermalna produkcja roztworów krzemianu potasu oparta jest na reakcji źródła dwutlenku krzemu z wodnym roztworem wodorotlenku potasu
 - główne dane wejściowe do modelu upstream LCA: wodorotlenek potasu, źródło dwutlenku krzemu (np. piasek krzemionkowy) oraz zapotrzebowanie na energię i wodę
- odpady budowlane i rozbiórkowe (CDW): system modelowania Ecoinvent został wykorzystany do modelowania zawartości pochodzącej z recyklingu, co oznacza, że materiały wtórne lub materiały poddane recyklingowi mają jedynie wpływ procesów recyklingu
 - główne dane wejściowe do wcześniejszego modelu LCA: zapotrzebowanie na energię i wodę

6.3. Ocena wpływu cyklu życia (LCIA)

Ocena wpływu na środowisko została obliczona na poziomie punktu środkowego za pomocą metody oceny wpływu CML 2001. Metoda oceny wpływu CML 2001 ogranicza modelowanie ilościowe do wczesnych etapów łańcucha przyczynowo-skutkowego w celu ograniczenia niepewności, przy czym wyniki są pogrupowane w kategorie punktów środkowych zgodnie ze wspólnymi mechanizmami (np. zmiana klimatu) lub powszechnie akceptowanymi grupami (np. ekotoksyczność) (Guinée, 2002). Główne zasady metodyki CML 2001 opierają się na normach ISO 14040 i 14044, a czynniki charakteryzujące są aktualizowane, gdy dostępna jest nowa wiedza na znacznym poziomie (np. ostatnia aktualizacja danych z stycznia 2016r.) (thinkstep, 2019b). Wyniki metody oceny wpływu CML 2001 można przedstawić w kategoriach różnych potencjałów oddziaływania. Metoda oceny wpływu CML 2001 nie ocenia jednak zapotrzebowania na energię pierwotną (tj. energia pierwotna ze źródeł odnawialnych i nieodnawialnych) oraz całkowitego zużycia wody świeżej (zużycie świeżej wody). Dlatego zapotrzebowanie na energię pierwotną i całkowite zużycie świeżej wody zostały ocenione oddzielnie w oprogramowaniu do modelowania GaBi. Różny potencjał uderzenia i zapotrzebowanie na energię obliczone w LCA przedstawiono w Tabeli 10.

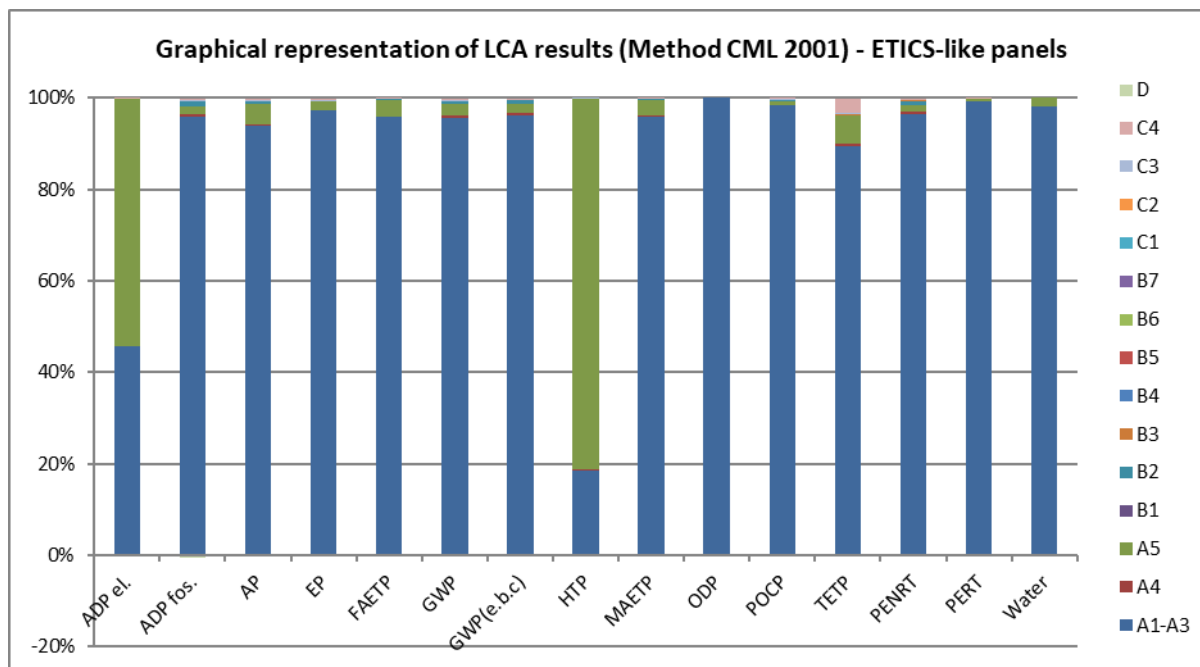
Tabela 10. Kategorie oddziaływania LCA i jednostki zastosowane do ich charakterystyki

Kategoria oddziaływania	Oznaczenie	Jednostka
Potencjał tworzenia efektu cieplarnianego	GWP	[kg CO ₂ eq.]
Potencjał efektu cieplarnianego z wyłączeniem biogenicznego węgla	GWP excl. biog. carbon	[kg CO ₂ eq.]
Potencjał zakwaszania	AP	[kg SO ₂ eq.]
Potencjał eutrofizacji	EP	[kg PO ₄ -3 eq.]

Potencjał toksyczności dla ludzi	HTP	[kg DCB eq.]
Potencjał zubożenia warstwy ozonowej	ODP	[kg R11 eq.]
Potencjał tworzenia fotochemicznego ozonu	POCP	[kg Ethene eq.]
Potencjał ekotoksyczności w wodach słodkowodnych	FAETP	[kg DCB eq.]
Potencjał ekotoksyczności w wodach morskich	MAETP	[kg DCB eq.]
Potencjał ekotoksyczności naziemnej	TETP	[kg DCB eq.]
Zubożenie abiotyczne (pierwiastki)	ADP el.	[kg Sb eq.]
Zubożenie abiotyczne (kopaliny)	ADP fos.	[MJ]
Energia pierwotna ze źródeł nieodnawialnych	PENRT	[MJ]
Energia pierwotna ze źródeł odnawialnych	PERT	[MJ]
Zużycie świeżej wody	WATER	[kg]

6.4. Interpretacja LCA

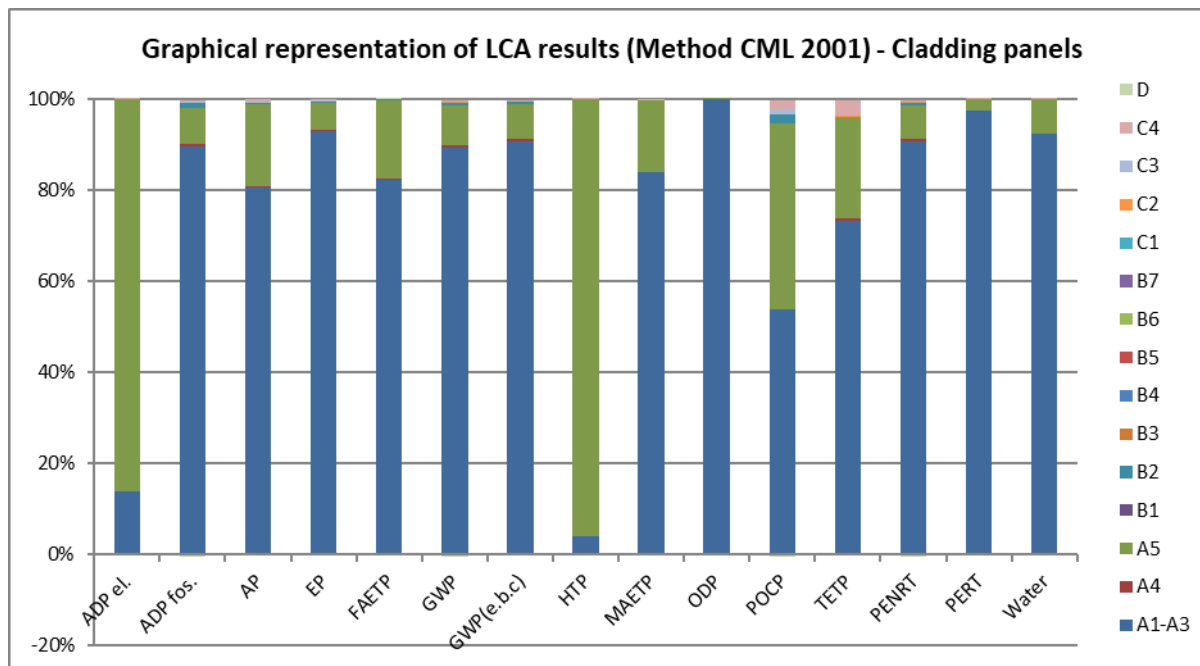
Ryc. 101 pokazuje wpływ na środowisko związany z różnymi etapami cyklu życia prefabrykowanego geopolimerowego panelu ETICS-podobnego. Na Ryc. 101 widać, że etap produktu (moduły A1-A3) najbardziej przyczynia się do wpływu na środowisko rozważanego prefabrykowanego panelu geopolimerowego. Innym etapem cyklu życia, który ma bardziej znaczący wpływ na środowisko, jest etap procesu budowlanego (moduł A5) pod względem ADP el. i HTP. Wszystkie pozostałe etapy cyklu życia mają minimalny wpływ na oddziaływanie środowiskowe prefabrykowanych paneli geopolimerowych.



Ryc. 101. Wyniki LCA dla paneli ETICS-podobnych

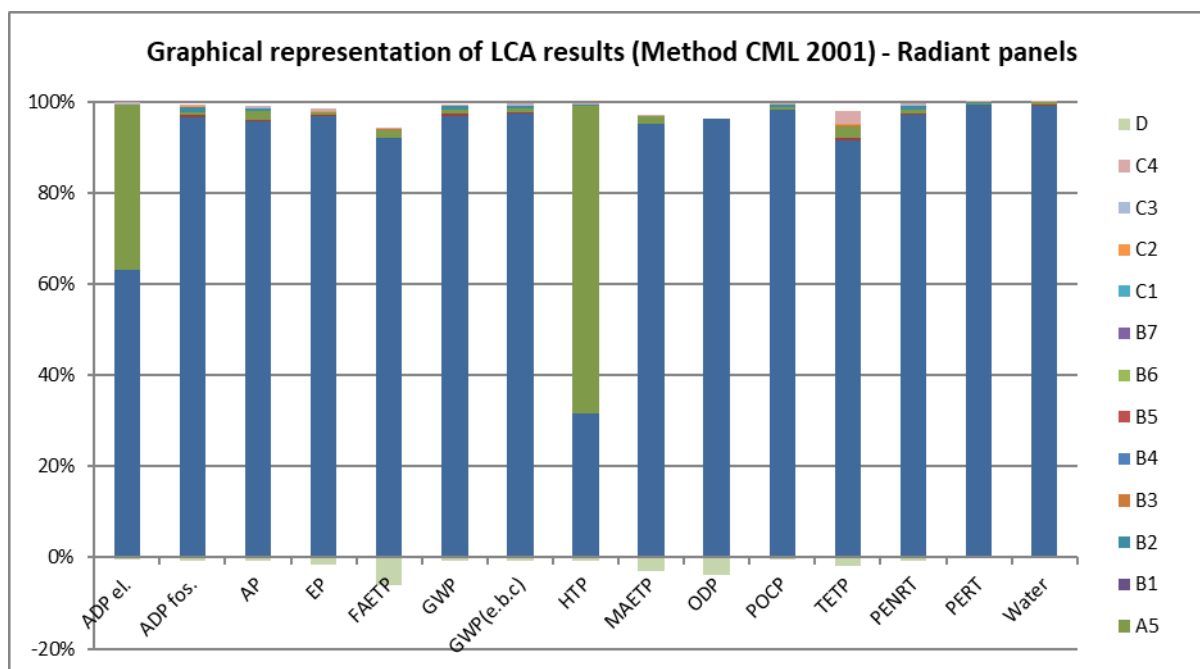
Podobnie, Ryc. 102 pokazuje wpływ na środowisko związany z różnymi etapami cyklu życia prefabrykowanego geopolimerowego panelu okładzinowego do fasad wentylowanych. Etap produktu (moduły A1-A3) ponownie najbardziej przyczynia się do wpływu na środowisko rozważanego prefabrykowanego panelu geopolimerowego. Innym etapem cyklu życia, który ma

bardziej znaczący wpływ na środowisko, jest etap procesu budowlanego (moduł A5) pod względem elementów ADP, HTP, POCP i TETP. Wszystkie pozostałe etapy cyklu życia mają minimalny wpływ na działanie panelu elewacyjnego na środowisko.



Ryc. 102. Wyniki LCA dla panelu okładzinowego do fasad wentylowanych

Wreszcie, Ryc. 103 pokazuje wpływ na środowisko związany z różnymi etapami cyklu życia prefabrykowanych geopolimerycznych paneli promieniujących. Etap produktu (moduły A1-A3) ponownie najbardziej przyczynia się do wpływu na środowisko rozważanego prefabrykowanego panelu geopolimerowego. Innym etapem cyklu życia, który ma bardziej znaczący wpływ na środowisko, jest etap procesu budowlanego (moduł A5) pod względem ADP el. i HTP. Podobnie jak w innych rodzajach paneli, wszystkie pozostałe etapy cyklu życia mają minimalny wpływ na efektywność środowiskową promiennika.



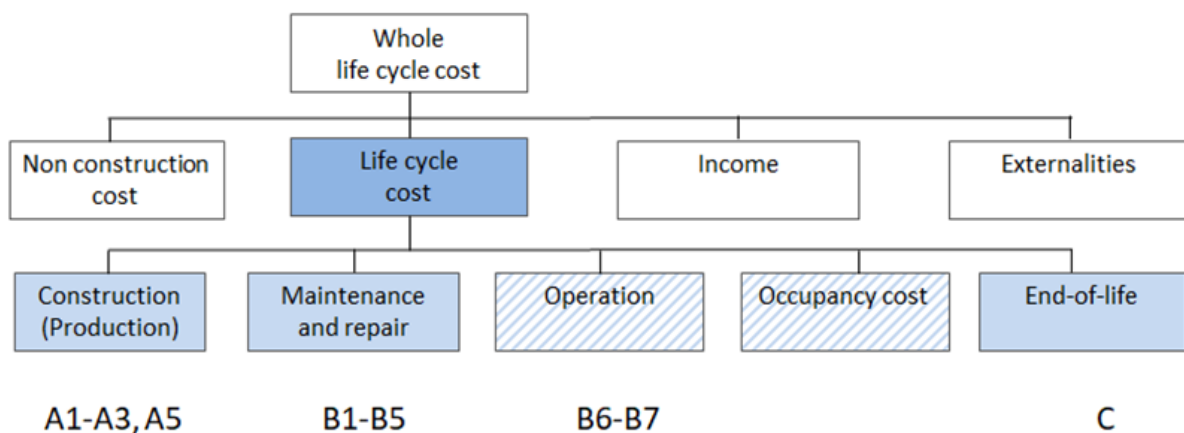
Ryc. 103. Wyniki LCA dla paneli promieniujących

Zaprezentowane wyniki modelowania LCA wykazały, że etap produktu (moduły A1-A3) najbardziej przyczynia się do wpływu na środowisko rozważanych prefabrykowanych paneli geopolimerowych. Dlatego wszelkie potencjalne zmniejszenie obciążenia środowiska związane z cyklem życia rozważanych prefabrykowanych paneli powinny opierać się przede wszystkim na potencjalnej poprawie procesu produkcji paneli.

7. Koszt cyklu życia – LCC

Koszt cyklu życia (LCC) jest obliczany, jeśli zachodzi potrzeba poznania rzeczywistych kosztów produktu w czasie (nie tylko kosztów początkowych), ponieważ bardzo często koszty powstające w czasie „życia” produktu przekraczają początkowe koszty produkcji. W obliczeniach LCC wykrywane są różne koszty, jak widać na Ryc. 104. Podejście do obliczania LCC dla wybranych paneli InnoWEE jest podejściem modułowym, tj. rozbiem kosztów na poszczególnych etapach cyklu życia, które są takie same jak w przypadku LCA.

Ryc. 104 pokazuje schematyczny rysunek przedstawiający stosunek kosztów całego cyklu życia (WLC) budynku i kosztów cyklu życia (LCC) zastosowanych do produktu. Kolorowe kwadraty zostały uwzględnione w analizie LCC prefabrykowanych paneli geopolimerowych. Koszty eksploatacji i obłożenia nie odnoszą się bezpośrednio do produktu InnoWEE, a zatem wkład wynosi zero.



Ryc. 104. Schemat analizy LCC w InnoWEE

Na Ryc. 104 pokazano również, w jaki sposób brana jest pod uwagę modułowość cyklu życia. Istnieją osobne kalkulacje kosztów produkcji dla produkcji (A1-A3), fazy instalacji (A5), użytkowania (B1-B7) i fazy wycofania (C). B6-B7 są ustalone jako zero, ponieważ produkt nie zużywa energii ani innych cennych substancji (np. wody). Transport (A4) jest pomijany, ponieważ jest specyficzny dla każdego budynku.

W przypadku kosztów zewnętrznych szacuje się ewentualne koszty emisji, ponieważ na przykład emisje CO₂ przyczyniłyby się do ceny systemu, chociaż są one alokowane w module A3. Koszt jest bezpośrednio związany z emisją CO₂ mierzoną przez GWP w LCA.

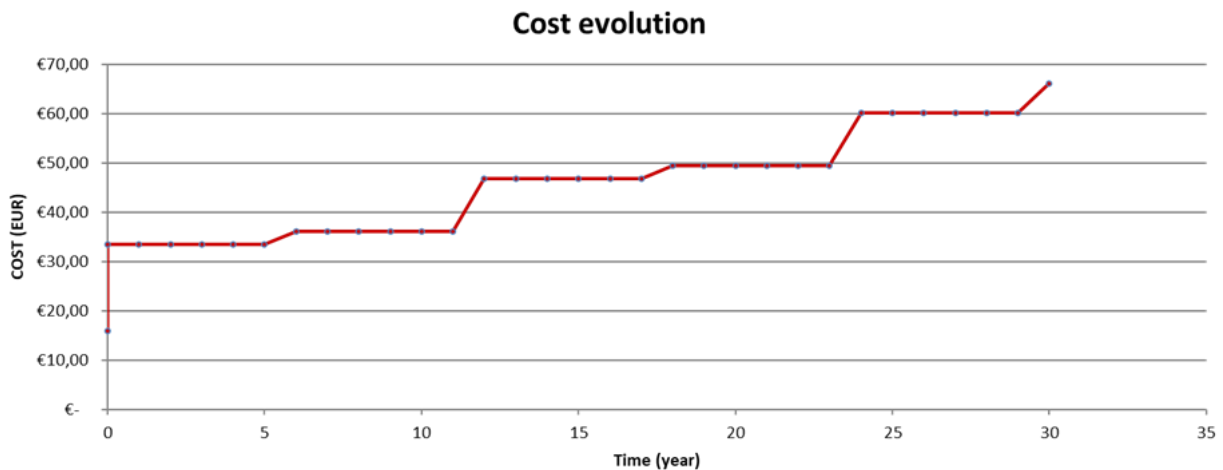
Przy obliczaniu LCC dla produktów InnoWEE uwzględniono szczególne założenia:

- koszt produkcji prototypów jest znany i służy jako podstawa,
- realistycznie uwzględniono industrializację,
- koszty instalacji oparte są na danych projektowych i porównywalnych danych,
- konserwacja zainstalowanych produktów zależy od scenariuszy i zależna jest od lokalizacji i konkretnych warunków użytkowania,
- koszty związane z wycofaniem z eksploatacji (moduł C): koszty rozbiórki, koszty transportu, opłaty i podatki (np. koszty wywozu na składowisko) są oparte na cenach bieżących;
 - koszt ten zależy w dużym stopniu od lokalizacji składowiska,
 - ogólnie wzrasta koszt usuwania,
- uwzględniono koszty środowiskowe związane z produkcją (emisje CO₂, NO/NO_x i SO₂), ale wykrywane są tylko koszty emisji CO₂.

Wszystkie założenia opierają się na starannie ocenianych parametrach, zapewniając realistyczny wynik obliczenia kosztu końcowego.

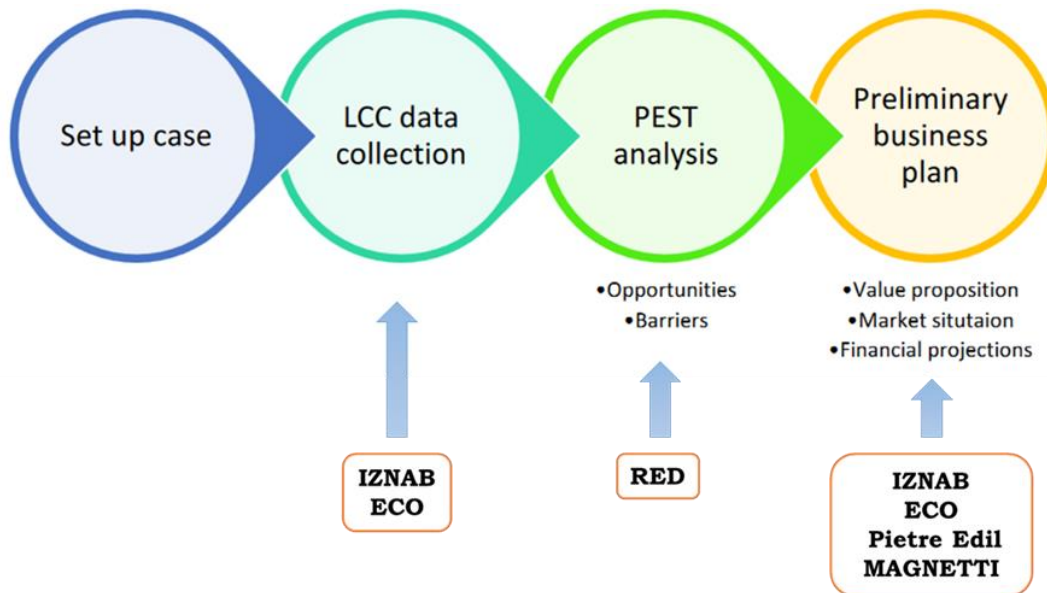
Niejednoznaczności wpływające na ostateczne wyniki LCC są głównie związane z lokalizacją budynku, w którym mają zostać zainstalowane produkty InnoWEE. Główne czynniki, które są zależne od lokalizacji, to (i) koszt siły roboczej, (ii) lokalna dostępność określonych komponentów oraz (iii) warunki klimatyczne, które mogą wpływać (zmniejszać w porównaniu z obecnymi obliczeniami) na koszty utrzymania.

W tych obliczeniach koszty pochodzą albo z samych danych projektu, albo (takich jak koszty składowania) z oficjalnych źródeł.



Ryc. 105. Koszt cyklu życia (LCC) – Wyniki w scenariuszu industrializacji

Obliczenia na Ryc. 105 pokazują ewolucję kosztów w czasie. Oczywiście jest, że początkowy koszt produktu (w momencie 0) jest stosunkowo niski. Koszt instalacji (w pierwszym roku, oznaczony wzrostem LCC w roku 0) zależy od konkretnej lokalizacji. Jeśli koszt instalacji jest mniejszy (np. tańsza siła robocza lub większy obszar objęty), cała krzywa zostaje przesunięta w dół. Obliczone koszty powstałe w fazie użytkowania (B1-B5) są stabilne. Dalsza optymalizacja konserwacji (np. ogólne interwencje w zakresie konserwacji budynku zamiast poszczególnych interwencji) mogą obniżyć koszty utrzymania. Ogólnie dane LCC pokazują dobre wyniki dla ocenianych produktów.



Ryc. 106. Metodologia zastosowana w wstępnej ocenie kosztu produkowanych SRM

Ocena zachowania się produktu w całym jego cyklu życia polega na ocenie jego efektywności środowiskowej przy użyciu metody LCA oraz wydajności ekonomicznej przy użyciu metody LCCA. LCA ujawniło mocne strony i punkty krytyczne produktów opartych na HDG InnoWEE. Ponieważ jednak produkt znajduje się obecnie na etapie rozwoju, który nie obejmuje pełnej industrializacji, oczekuje się dalszej redukcji obciążeń dla środowiska. Wraz z uprzemysłowieniem możliwa jest dalsza optymalizacja pod względem zaopatrzenia w energię ocenianych produktów. Ponieważ faza produkcji ma największy udział w prawie wszystkich rozważanych wskaźnikach, większość optymalizacji można przeprowadzić w tej fazie cyklu życia, szczególnie w zakresie dostaw energii poprzez wprowadzenie energii odnawialnej (np. energii słonecznej).

Podejście oparte na kosztach cyklu życia daje dodatkowy wgląd w ewolucję kosztów w czasie i pokazuje, że koszty produkcji nie są wyraźnie dominujące. Wykazano, że koszty utrzymania silnie zależą również od lokalizacji budynku, ze względu na koszty siły roboczej, a także obciążenie środowiskowe odstępionych elementów. Należy zauważyć, że szacunki są stabilne, jeśli chodzi o częstotliwość interwencji.

Generalnie, biorąc pod uwagę zarówno analizę środowiskową, jak i kosztową, produkty InnoWEE są porównywalne z podobnymi produktami na rynku. Co więcej, po uprzemysłowieniu produkcji panele InnoWEE mają ogromny potencjał, by przewyższyć porównywalne produkty na rynku.

8. Podsumowanie

W ramach polityk Unii Europejskiej w zakresie zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym, europejski projekt H2020 RIA InnoWEE – „Innowacyjne komponenty prefabrykowane, wykorzystujące różne odpady budowlane i rozbiórkowe, redukujące zapotrzebowanie energetyczne budynku i minimalizujące wpływ na środowisko” – rozpoczęty w 2016 r., opracował trzy rodzaje prefabrykowanych paneli architektonicznych służących poprawie charakterystyki energetycznej budynków, które odpowiadają za około 40% całkowitego zużycia energii w UE. Zastosowania docelowe InnoWEE obejmowały istniejące budynki wymagające renowacji, ze szczególnym uwzględnieniem budynków należących do dziedzictwa kulturowego. Panele te zostały wyprodukowane z specjalnie opracowanymi innowacyjnymi spoiwami geopolimerowymi, zdolnymi do osadzania dużych ilości kruszyw z odpadów budowlanych i rozbiórkowych, zgodnie z celami UE określonymi w dyrektywie ramowej w sprawie odpadów.

W rzeczywistości, w ciągu 4 lat InnoWEE podążyło ścieżką celowo podobną do ścieżki firmy, która chce opracować produkt od koncepcji do potencjalnego wprowadzenia na rynek. Poziom gotowości technologicznej (TRL) dla każdego rodzaju paneli został pomyślnie podniesiony z poziomu 3 (dowód koncepcji) do poziomu 6/7 (demonstracja w odpowiednim/operacyjnym środowisku), zajmując się ich rozwojem z holistycznym podejściem, które dotyczyło wszystkich następujących aspektów: kwestie technologiczne, obowiązujące normy techniczne i przepisy, obawy dotyczące zdrowia i bezpieczeństwa, lokowanie rynku, planowanie przemysłowe i biznesowe, a na koniec analiza cyklu życia.

W związku z tym w kontekście zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym zbadano i zoptymalizowano materiały geopolimerowe oraz przemysłowe metody produkcji paneli w celu uzyskania wydajnych i opłacalnych produktów. Przydatność do zamierzonego zastosowania i efektywność termiczna paneli zostały przetestowane w laboratorium i w instalacjach demonstracyjnych, a następnie sprawdzono je za pomocą skalibrowanych modeli numerycznych. W planowaniu przemysłowym i biznesowym praktycznie wykorzystano potencjał rynkowy tych produktów, a także oceniono wpływ na środowisko, społeczeństwo i gospodarkę.

Konkretniej, materiały geopolimerowe, które stanowiły główny element paneli InnoWEE i zawierały do 50% kruszyw pochodzących z recyklingu z CDW, zostały dokładnie zbadane, a wreszcie przeprowadzona optymalizacja heurystyczna była w stanie sprostać wymaganiom produkcji przemysłowej i zapewnić zadowalającą jakość produkty końcowe. Co więcej, ich przydatność do ponownego użycia pod koniec cyklu życia jako kruszywa poddane recyklingowi została wstępnie oceniona, co sugeruje potencjalną wykonalność produkcji w obiegu zamkniętym.

Trzy rodzaje paneli, tj. typu ETICS do zewnętrznej izolacji, do wentylowanych fasad i do wewnętrznego ogrzewania/chłodzenia radiacyjnego, zostały zaprojektowane, prototypowane i wyprodukowane z technologią pilotażowego zwiększania skali, która została pomyślnie opracowana i celowo wdrożona.

Panele zostały szeroko przetestowane pod względem ich właściwości mechanicznych i fizycznych oraz trwałości, zgodnie z przepisami wybranych ETAG i EN. Oceniono następujące parametry: kapilarny pobór wody, przepuszczalność pary wodnej, odporność na uderzenia, wytrzymałość wiązania, zachowanie przy odmrażaniu, zamrażanie w obecności soli odladzającej, odporność na karbonatyzację, reaktywność krzemionki alkalicznej i odporność na siarczany. Z wyjątkiem

odporności na zamarzanie w obecności soli odladzającej, wszystkie inne wyniki były porównywalne lub nawet przewyższały produkty na bazie cementu.

Instalacja na czterech budynkach demonstracyjnych zlokalizowanych w różnych regionach klimatycznych (Grecja, Belgia, Włochy i Rumunia), które były monitorowane przed i po instalacji, pozwoliła na systematyczne badanie wydajności cieplnej podczas pracy, zapewniając w ten sposób cenne dane do modelowania numerycznego. Obserwowano również trwałość aplikacji zewnętrznych dzięki okresowym testom nieniszczącym.

Prawdziwe budynki demonstracyjne dostarczyły zbiór danych wykorzystywanych w modelowaniu energii budynków (BEM) w celu weryfikacji strategii symulacji i kalibracji modeli. Na podstawie danych uzyskanych z systemów monitorowania symulacje 3D czterech wirtualnych budynków demonstracyjnych (zlokalizowanych we Włoszech, Grecji, Rumunii i Hiszpanii) pozwoliły na ocenę wydajności paneli w różnych sytuacjach i uzyskanie optymalnego projektu w oparciu o różne scenariusze.

W końcu, analizy LCA, obliczone dla instalacji pilotażowej, wykazują pozytywne wyniki w odniesieniu do wpływu na środowisko. Odstąpione punkty krytyczne ujawniają kwestie dalszej optymalizacji i pełnego skalowania, które ostatecznie prowadzą do ogólnie lepszej efektywności środowiskowej w porównaniu z rozwiązaniami dostępnymi na rynku. Analiza kosztów pokazuje również potencjał konkurencyjnych produktów, gdy produkty zostaną w pełni powiększone, a produkcja w pełni uprzemysłowiona.

Odniesienia

Strona internetowa i sieci społecznościowe



www.innowee.eu



https://twitter.com/InnoWEE_H2020



<https://www.linkedin.com/company/innowee-project/>



<https://www.facebook.com/InnoWEE/>



<https://www.instagram.com/innowee/>



<https://www.youtube.com/channel/UCHBqCg99kX1XaaDttpT2ZOw>



https://zenodo.org/communities/innowee_h2020_project/?page=1&size=20



https://explore.openaire.eu/search/project?projectId=corda_h2020::ad86c8f2e07c3e2cd38388d235dc1628

Publikacje

- Panizza, M., Natali, M., Garbin, E., Tamburini, S., & Secco, M. (2018). *Assessment of geopolymers with Construction and Demolition Waste (CDW) aggregates as a building material*. CONSTR BUILD MATER, 181:119-133. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.018
- ZAG (2018). *Projekt InnoWEE - Razvoj Gradbenih Proizvodov s Tehnologijo Alkalijskie Aktivacije*. Gradbenik. Ljubljana, Slovenia. doi.org/10.5281/zenodo.3686608
- Frankovič, A., Ducman, V., Kramar, S., Panizza, M., Tamburini, S., Natali, M., Pappa, M., Tsoutis, C., Bernardi, A. (submitted). *Up-scaling and performance assessment of façade panels produced from CDW by alkali activation technology*. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, 262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120475>
- Panizza, M., Natali, M., Garbin, E., Ducman, V. & Tamburini, S. (submitted). *Optimization and mechanical-physical characterization of geopolymers with Construction and Demolition Waste (CDW) aggregates for construction products*. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, 264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120158>
- Kvočka, D., Lešek, A., Knez, F., Ducman, V., Panizza, M., Tsoutis, C., Bernardi, A. *Life Cycle Assessment of Prefabricated Geopolymeric Façade Cladding Panels Made from Large Fractions of Recycled Construction and Demolition Waste*. MATERIALS, 13 (18). <https://doi.org/10.3390/ma13183931>
- Frankovič, A. *Evaluation of innovative façade panels with a finishing layer of alkali-activated industrial and construction waste*. University of Ljubljana – Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Ljubljana, Slovenia. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4106500>

Artykuły konferencyjne

- Ducman, V., Frankovič, A., Dolenc, S., Tamburini, S., Natali, M., Bernardi, A. Durability assessment of geopolymer façade panels based on CDW. V: Martins, I.M. (ur.), Ulsen, C. (ur.), Villagran, Y. (ur.). The Proceedings of the IV International Conference Progress of recycling in the built environment: 11-12 October 2017, Lizbon, Portugal, (RILEM Proceedings, PRO 124). PARIS: RILEM publications. 2018, pp 307-314, <https://www.rilem.net/publication/publication/492>. [COBISS.SI-ID 2425447]. doi.org/10.5281/zenodo.3268426
- Knez, N., Knez, F., Ducman, V., Tamburini, S., Natali, M., Bernardi, A. Reaction to fire properties of wood waste-based geopolymer panels. V: Martins, I.M. (ur.), Ulsen, C. (ur.), Villagran, Y. (ur.). The Proceedings of the IV International Conference Progress of recycling in the built environment: 11-12 October 2017, Lizbon, Portugal, (RILEM Proceedings, PRO 124). PARIS: RILEM publications. 2018, pp 488-495, <https://www.rilem.net/publication/publication/492>. [COBISS.SI-ID 2425703]. doi.org/10.5281/zenodo.3268462
- Bernardi, A., Tamburini, S., Failla, C., Signorini, S., Sonzogni, F. The InnoWEE Project: from waste to energy efficiency. Italian Concrete Days 2018, 13 June 2018, Milano, Italy. doi.org/10.5281/zenodo.3570999
- Fodor, L., Ducman, V., Ferrarini, G., Tamburini, S., Tsoutis, C., Becherini, F., Garrido-Marijuán, A., Mezzasalma, G., Rossi, L., Lezak, E., Bernardi, A. Innovative pre-fabricated components including different waste construction materials reducing building energy and minimising environmental impacts (InnoWEE). V: Clima 2019: built environment facing climate change, REHVA 13th HVAC World Congress, 26 - 29 May 2019, Bucharest, Romania. doi.org/10.1051/e3sconf/201911103076
- Ferrarini, G., Bison, P., Bortolin, A., Cadelano, G., Natali, M., Panizza, M., Tamburini, S. A novel experimental setup for the stress test of geopolymer-based hydronic radiant panels using infrared thermography. V: QIRT Asia 2019, 1 – 5 July 2019, Tokyo, Japan. doi.org/10.5281/zenodo.3557714
- Arregi, B., Garay, R., Garrido-Marijuan, A. Assessment of thermal performance and surface moisture risk for a rear-ventilated cladding system for façade renovation. V: SBE19-Thessaloniki: Sustainability in the built environment for climate change mitigation, 23 – 25 October 2019, Thessaloniki, Greece. doi.org/10.1088/1755-1315/410/1/012102

Lista skrótów i symboli

Skróty

6σ	Metodologia Sześć Sigma	FEM	Modelowanie elementów skończonych
AAM	Materiały aktywowane alkaliami	GWP	Potencjał globalnego ocieplenia
AC	Prąd zmienny	H2020	Program ramowy Horyzont 2020
ADP	Wyczerpanie abiotyczne	HDG	Geopolimer wysokiej gęstości
AP	Potencjał zakwaszenia	hEN	Zharmonizowana norma europejska
ASR	Reaktywność z krzemionką alkaliczną	HTP	Potencjał toksyczności dla człowieka
ASTM	Amerykańskie Stowarzyszenie Badań i Materiałów	ICP MS	Indukcyjnie sprzężony spektrometr mas plazmowych
AVCP	Ocena i weryfikacja stałości właściwości użytkowych	InnoWEE	Innowacyjne komponenty prefabrykowane, wykorzystujące różne odpady budowlane i rozbiórkowe, redukujące zapotrzebowanie energetyczne budynku i minimalizujące wpływ na środowisko
BIM	Modelowanie informacji budynku	ISO	Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna
BEM	Modelowanie energii budynku	K-sil	Krzemian potasu
C&D	Budowa i rozbiórka	LCA	Ocena cyklu życia
CDW	Odpady budowlane i rozbiórkowe	LCC	Koszt cyklu życia
CE	Conformité Européenne / Europejska zgodność	LCCA	Analiza kosztu cyklu życia
CLP	Klasyfikacja, oznakowanie i pakowanie	LCI	Inwentaryzacja cyklu życia
CO₂	Dwutlenek węgla	LEEMA	Materiały izolacyjne o niskiej zawartości energii i elementy murowe do budynków energooszczędnych
CPR	Rozporządzenie w sprawie wyrobów budowlanych	MAETP	Potencjał morskiej ekotoksyczności wodnej
DMAIC	Definiuj, Mierz, Analizuj, Ulepszaj, Kontroluj	MK	Metakaolin
EAD	Europejski Dokument Oceny	NDT	Badania nieniszczące
EC/KE	Komisja Europejska	NO/NO_x	Tlenek/tlenki azotu
EFT	Test częstotliwości	NPT	Czas produkcji netto
EN	Norma Europejska	ODP	Potencjał niszczenia warstwy ozonowej
EOTA	Europejska Organizacja Oceny Technicznej	PAH	Wielopierścieniowy węglowodór aromatyczny
EoW	Koniec odpadu	PCB	Polichlorowany bifenyl
EP	Potencjał eutrofizacji	PENRT	Energia pierwotna z zasobów nieodnawialnych
EPS	Rozszerzony polistyren	PERT	Energia pierwotna z zasobów odnawialnych
ETA	Europejska Ocena Techniczna		
ETAG	Europejskie wytyczne dotyczące aprobaty technicznej		
ETICS	Zewnętrzny system kompozytowy do izolacji termicznej		
UE	Unia Europejska		
FA	Lotny popiół		
FAETP	Potencjał ekotoksyczności w wodach słodkowodnych		
FE	Element skończony		

PEST	Polityczny, gospodarczy, społeczny i technologiczny	TAB	Jednostka ds. oceny technicznej
PEX-a	Usieciowany polietylen	TETP	Potencjał naziemnej ekotoksyczności
PMV	Przewidywana średnia ocena	TOC	Całkowity węgiel organiczny
POCP	Potencjał tworzenia fotochemicznego ozonu	TRL	Poziom gotowości technologicznej
PP	Polipropylen	TUPP	Instalacja pilotażowa do zwiększania skali technologii
PPD	Przewidywany odsetek niezadowolonych	UHTS	Ultra-wysoka wytrzymałość na rozciąganie
PU	Poliuretan	UPS	Nieprzerwana dostawa energii
QAP	Plan kontroli jakości	UPV	Czas przepływu impulsu ultradźwiękowego
R&I	Badania i innowacje	VF	Wentylowana fasada
REACH	Rejestracja, ocena, autoryzacja i ograniczenie chemikaliów	VOC	Lotne związki organiczne
RH	Wilgotność względna	WG	Geopolimer drzewny
RIA	Działanie w zakresie badań naukowych	WGP	Panel z geopolimeru drzewnego
SHT	Obróbka cieplna powierzchni	WLC	Cały cykl życia
SO₂	Dwutlenek siarki	WP	Pakiet roboczy
SRM	Surowce wtórne	XPS	Wytłaczany polistyren
SWA	Powierzchniowa absorpcja wody	XRF	Fluorescencja rentgenowska

Symbole

P	Moc	m²	metr kwadratowy
T	Temperatura	m³	metr sześcienny
%	Procent	kg/m²	kilogram na metr kwadratowy
°C	Stopień Celsjusza	N/mm²	Newton na milimetr kwadratowy
g	gram	W/m⁻¹·K⁻¹	Watt na metr na Kelvin
kg	kilogram	min	minuta
km	kilometr	kWh	kilowatogodzina
m	metr	€	euro
cm	centymetr	kWh/yr	kilowatogodzina na rok
mm	milimetr	kWh/m²·yr	kilowatogodzina na metr kwadratowy na rok
µm	mikrometr		

Partnerzy i ludzie



CNR-ISAC

National Research Council – Institute of Atmospheric Sciences and Climate

Corso Stati Uniti 4, 35127 Padova, Italy

Adriana Bernardi – Koordynator projektu
Gianluca Cadelano



CNR-ICMATE

National Research Council – Institute of Atmospheric Sciences and Climate

Corso Stati Uniti 4, 35127 Padova, Italy

Sergio Tamburini
Marco Natali
Matteo Panizza



CNR-ITC

National Research Council – Institute for Construction Technologies

Corso Stati Uniti 4, 35127 Padova, Italy

Paolo Bison
Giovanni Ferrarini



AMSOLUTIONS

AMS LTD. – R&D Department

Nika 15, 13671, Acharnes, Athens, Greece

Maria Sachini
Constantinos Tsoutis



RED

RED S.l.r.

Viale dell'industria 58E, 35127 Padova, Italy

Giulia Mezzasalma
Luc Pockelé



TECNALIA

TECNALIA Research & Innovation

Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Astondo Bidea
Edificio 700, 48160 Derio, Spain

Ander Romero Amorrortu
Beatriz Fraga De Cal
Antonio Garrido Marijuan
Beñat Arregi Goikolea



ECO

GUIDOLIN GIUSEPPE – ECO. G. SRL

Via per San Floriano 29, 31033 Castelfranco Veneto (TV), Italy

Giulia Ceschel
Mirco Bordignon
Magaton Tomas



Pietre Edil

SC Pietre Edil SRL

Strada Slănic 3, 030167 Bucharest, District 3, Romania

Leonardo Rossi
Loredana Fodor
Alexandru Tanase



IZNAB

IZNAB SPOLKA Z OGRANICZONA ODPOWIEDZIALNOSCIA

Al. Jana Pawła II 23, 00-854 Warsaw, Poland

Emil Lezak
Jakub Pluta



ZAG

Slovenian National Building and Civil Engineering Institute

Dimičeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenia

Vilma Ducman
Friderik Knez
Sabina Dolenc
Ana Frankovič
Nataša Knez
Anja Lešek
Davor Kvočka
Sebastjan Robič
Aljoša Šajna



MAGNETTI

Magnetti Building S.p.A.

Via Don Angelo Pedrinelli 118, 24030 Carvico (BG), Italy

Casati Anna
Signorini Sergio
Sonzogni Francesco



VOULA

Dimos Varis-Voulas-Vouliagmenis

Leoforos Karamanli 18, 16673 Voula, Greece

Dimitris Apostolopoulos
Evangelos Demetriou



www.innowee.eu



*„Projekt otrzymał dofinansowanie z unijnego programu badań i innowacji
„Horyzont 2020” na podstawie umowy grantowej nr 723916”*