

SPIS TREŚCI

1. CEL I ZAKRES OPRACOWANIA.....	4
1.1. Wprowadzenie.....	4
1.2. Cel i zakres opracowania	6
1.3. Podstawy opracowania.....	8
2. SPECYFIKACJA TECHNICZNA PROTOTYPOWEGO ROZWIĄZANIA STROPODACHU FIRMY „DACH I STRYCH” SP. Z O.O.	12
3. WYNIKI OBLICZEŃ WSPÓŁCZYNNIKA PRZENIKANIA CIEPŁA DLA PROTOTYPOWEGO STROPODACHU „DiS SYSTEM”	21
3.1. Procedura wyznaczania współczynnika przenikania ciepła dla warstwowej przegrody poziomej	21
3.2. Przykład obliczeń dla wariantu stropodachu „DiS system”	22
3.3. Wyniki przeprowadzonych analiz	25
3.4. Wnioski przeprowadzonych analiz	28
3.5. Wyznaczanie własności akustycznych analizowanej przegrody.....	31
3.6. Przyjęta metodyka badań do wyznaczania wskaźnika izolacyjności akustycznej z zastosowaniem wybranych metod sztucznej inteligencji	32
3.6.1. Porównanie sieci neuronowych i metody SVM	33
3.6.2. Opis metody SVM w ujęciu regresyjnym (ϵ -SVR)	36
3.6.3. Ustalanie optymalnych wartości hiperparametrów (C , ϵ , σ) dla metody ϵ -SVR ..	39
3.6.4. Wyniki uzyskanych analiz dotyczących wyznaczania wartości wskaźnika izolacyjności R_w	40
4. ANALIZA PORÓWNAWCZA WSPÓŁCZESNYCH ROZWIĄZAŃ LEKKICH STROPODACHÓW WARSTWOWYCH	41
5. PROPOZYCJA ULEPSZONEGO ROZWIĄZANIA STROPODACHU WARSTWOWEGO... ..	49
5.1. Wskazanie modyfikacji materiału termoizolacyjnego.....	49
5.2. Optymalizacja grubości warstwy termoizolacyjnej PUR - obliczenia	49
5.3. Porównanie kosztów dla stropodachu z warstwą termoizolacyjną z wełny mineralnej oraz zaproponowaną modyfikacją	52
6. ANALIZA NUMERYCZNA PROPONOWANEGO PRZEKRYCIA DACHOWEGO	53
7. OCENA ZAPLECZA TECHNOLOGICZNEGO FIRMY „DACH I STRYCH”	58
7.1. Analiza efektywności proponowanej modyfikacji zaplecza technologicznego w aspekcie czasu pracy i kosztów produkcji.....	67
8. OCENA TECHNOLOGII PROCESU WZNOSZENIA DACHÓW W RAMACH INWESTYCJI BUDOWLANYCH PROWADZONYCH PRZEZ FIRME „DACH I STRYCH”	72
8.1. Rekonstrukcja dachu budynku Banku Pekao SA przy ulicy Pijarskiej w Krakowie ..	72
8.2. Budowa stropodachu nad budynkiem hali przy ul. Rakowickiej w Krakowie	74
8.3. Ustalanie ulepszonych rozwiązań stropodachu pod kątem własności termicznych i akustycznych	76
9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	76
9.1. Ustalanie ulepszonych rozwiązań stropodachu pod kątem własności termicznych i akustycznych	76
9.2. Porównanie innych cech technicznych oraz kosztów stosowania pianki poliuretanowej PUR i wełny mineralnej w rozwiązaniach stropodachów	82
9.3. Ocena zaplecza technologicznego oraz propozycje modernizacji.....	83
9.4. Ocena wybranych realizacji inwestycji związanych ze wznoszeniem dachów	84

SPIS ZAŁĄCZNIKÓW

ZAŁĄCZNIK 1

Wyniki wariantowej symulacji wartości współczynnika przenikania ciepła U [W/m^2K]
dla warstwowych przegród dachowych

ZAŁĄCZNIK 2

Wyniki wyznaczania wartości wskaźnika izolacyjności akustycznej R_w
dla prototypowych przegród dachowych
z zastosowaniem wybranych metod sztucznej inteligencji

1. CEL I ZAKRES OPRACOWANIA

1.1. Wprowadzenie

Od wielu lat obserwuje się wzrost cen źródeł energii oraz rosnące na nią zapotrzebowanie. Są to czynniki wpływające na zwiększenie zainteresowania indywidualnych odbiorców, a także rządów państw i organizacji międzynarodowych możliwościami oszczędzania energii. Ponadto wzrost zużycia energii na świecie wiąże się również ze zwiększeniem emisji CO₂ do atmosfery. Destrukcyjny wpływ CO₂ na środowisko skłania społeczność międzynarodową do podejmowania prób ograniczenia jego emisji. Dodatkowo w Unii Europejskiej argumentem przemawiającym za koniecznością oszczędzania energii jest zależność od importowanych zasobów energii. Ocenia się, że największy potencjał oszczędności leży w budownictwie, dlatego Dyrektywa 2002/91/EC [1] w sprawie charakterystyki energetycznej budynków uchwalona przez Parlament Europejski w dniu 16 grudnia 2002 r., dotyczy tego działu gospodarki.

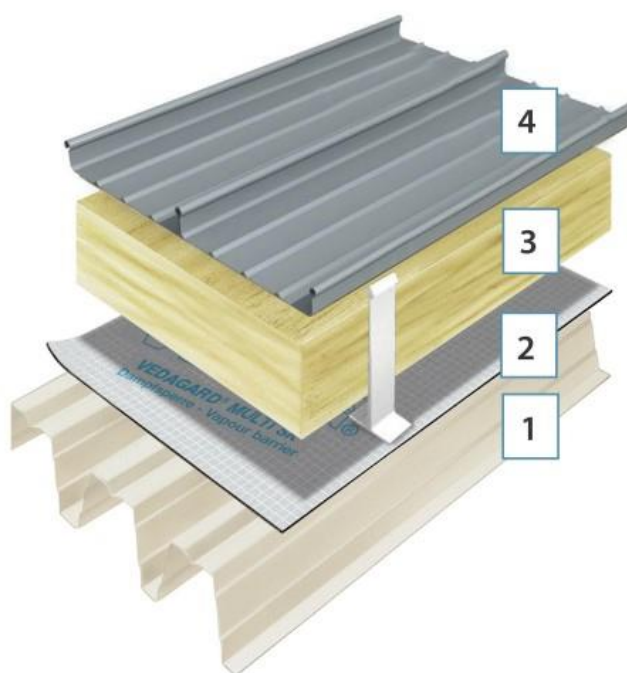
W polskim prawie, konsekwencją wprowadzenia Dyrektywy 2002/91/EC, są zmiany w ustawie Prawo budowlane [4] oraz przepisach techniczno-budowlanych. Między innymi, w ostatnich latach kilkakrotnie obniżono graniczne wartości współczynników przenikania ciepła U przez przegrody zewnętrzne oraz współczynników zapotrzebowania na energię E dla budynków [5], a także wprowadzono obowiązek sporządzania świadectw charakterystyki energetycznej (np. [6]).

W budynkach najwięcej energii zużywa się do ogrzewania ich wnętrza, a dalszej kolejności do przygotowania ciepłej wody użytkowej, wentylacji pomieszczeń, oświetlenia oraz funkcjonowania urządzeń wyposażenia [2, 3]. Dlatego też właśnie tam poszukiwane są możliwości redukcji jej zużycia. O kosztach ogrzewania budynków w największym stopniu decydują straty ciepła przez zewnętrzne przegrody budowlane oddzielające wnętrze od środowiska zewnętrznego, w tym m.in. ściany zewnętrzne, stropodachy, podłogi na gruncie i stolarka okienna. Wśród przegród zewnętrznych najintensywniejsze jednostkowe straty ciepła występują w przypadku stropodachów, co zostało uwzględnione w warunkach technicznych [5] poprzez przypisanie im najniższej granicznej wartości współczynnika przenikania ciepła U_{max} .

Stropodachy stanowią poziome lub pochylone zewnętrzne przegrody budowlane ograniczającą budynki od góry, pełniące równocześnie funkcję dachu oraz stropu nad

pomieszczeniami najwyższej kondygnacji. Ze względu na rodzaj konstrukcji i układ warstw stropodachy dzielimy na pełne z klasycznym lub z odwróconym układem warstw, oraz wentylowane np. odpowietrzane lub dwudzielne. Rozwiązanie pełne to takie, w przypadku którego poszczególne warstwy konstrukcyjna (przekrycie) oraz izolacyjne (paroizolacja, termoizolacja i izolacja przeciwwodna czyli pokrycie dachowe) bezpośrednio do siebie przylegają. Ponadto wyróżniamy stropodachy płaskie (czyli o pochyleniu połaci zbliżonym do minimalnego) lub strome, a także pulpitowe lub wielospadowe oraz z odwodnieniem zewnętrznym lub pogrążone.

Wśród budynków przemysłowych i użyteczności publicznej z płaskimi przekryciami, a zwłaszcza w przypadku produkcyjnych, magazynowych lub handlowych budynków szkieletowych typu halowego, najczęściej współcześnie stosowanym rozwiązaniem są lekkie warstwowe stropodachy pełne (por. rys. 1.1). Określenie „lekkie” charakteryzuje przegrody z warstwami izolacyjnymi ułożonymi na lekkim przekryciu ze stalowych ocynkowanych i powlekanych blach trapezowych, w odróżnieniu od ciężkiego przekrycia żelbetowego.



Rys. 1.1. Schemat przykładowego rozwiązania stropodachu na podłożu z blachy trapezowej: 1-blaszka trapezowa, 2-paroizolacja, 3-termoizolacja, 4-blachy na rąbek stojący [20]

1.2. Cel i zakres opracowania

Opracowanie ma charakter pracy badawczo-rozwojowej, której celem jest weryfikacja i udoskonalenie technologii lekkich warstwowych przegród dachowych, wykonywanych z wykorzystaniem łączników kątowych typu ZK produkowanych przez firmę Dach i Strych Sp. z o.o. z siedzibą w Krakowie. Technologia ta jest stosowana w trakcie realizacji inwestycji budowlanych wykonywanych przez firmę „Dach i Strych” sp. z o.o. na terenie całej Polski.

Podstawą analiz będą obliczone charakterystyki fizyczne określające izolacyjność termiczną oraz akustyczną badanych przegród. Wyznaczone parametry stanowiąc będą podstawę do sformułowania ewentualnych modyfikacji badanej technologii mających poprawić jakość analizowanych elementów w kontekście wyżej wymienionych charakterystyk fizycznych. Propozycje ewentualnych zmian w zakresie rozwiązań geometryczno-materiałowych ma zapewnić zgodność z warunkami technicznymi zawartymi w przepisach techniczno-budowlanych [4,5]. Prezentowane badania nabierają szczególnego znaczenia z uwagi na wprowadzane w ostatnich latach stopniowe zmiany warunków technicznych dotyczących charakterystyki energetycznej przegród budowlanych. W obliczeniach uwzględniane będą wartości wskaźników granicznych, które mają obowiązywać docelowo tj. od 01.01.2021 roku.

W pierwszej części, w **rozdziale 2** opracowania zestawiono dane dotyczące produkowanych przez firmę „Dach i Strych” stropodachów pod kątem technologicznym i materiałowym. Pozwoliło to określić obszar, w ramach którego podjęto próbę wskazania optymalnego rozwiązania stropodachu pod kątem parametrów termicznych i akustycznych. Zadanie to zrealizowano na drodze wielokrotnych obliczeń współczynnika przenikania ciepła U, dla materiałów, które są wykorzystywane najczęściej przez firmę „Dach i Strych”. Przyjęte założenia do obliczeń oraz uzyskane wyniki przedstawiono w ramach **rozdziału 3** oraz zestawiono na końcu opracowania w **załączniku 1**. Pozwoliły one na wytypowanie prototypowego rozwiązania, które posiada optymalne własności termoizolacyjne uwzględniając wymagania stawiane w [5]. Dodatkowo zweryfikowane zostały własności akustyczne wyłonionego prototypu, których parametry zostały przedstawione również w ramach rozdziału 3. W tym celu zastosowano podejście normowe oraz autorską metodykę bazującą na budowie i symulacji sztucznych sieci neuronowych i metody *Support Vector Machine* w oparciu o zabrane dane o empirycznie

ustalonych własnościach akustycznych 150 przegród dachowych różnych producentów o zbliżonych cechach technologicznych do analizowanych w pracy prototypów firmy „Dach i Strych”. Wyniki te wyszczególniono w ramach **rozdziału 3** oraz poszerzono w **załączniku 2**.

W **rozdziale 4** dokonano porównania technologii stosowanej w firmie „Dach i Strych” z konkurencyjnymi rozwiązaniami stropodachów warstwowych, których właściwości techniczne mają zbliżone charakterystyki do prototypu wyłonionego w ramach badań opisanych w rozdziale 3.

Następnie w **rozdziale 5**, w oparciu o wytypowany prototyp zaproponowano jego modyfikację, która polegała na zmianie dotychczas stosowanego materiału termoizolacyjnego na inny, bardziej efektywny zarówno w sensie polepszenia własności termicznych, jak i obniżenia kosztów budowy stropodachu. Po analizie materiałów źródłowych dotyczących własności fizycznych materiałów termoizolacyjnych oraz wstępnych obliczeniach [niepublikowanych, znajdujących się w archiwum autorów] zdecydowano o zastosowaniu pianki poliuretanowej PUR. W tym celu przeprowadzono analizę optymalizacyjną w środowisku Matlab, która pozwoliła wytypować graniczne wartości grubości warstw termoizolacji z pianki poliuretanowej PUR. Uzyskano w ten sposób przegrodę, która cechuje się mniejszym ciężarem objętościowym oraz pozwala na obniżenie kosztów budowy z uwagi na zapotrzebowania materiałowe. Wyniki analizy szacunkowej kosztów zamieszczono również w ramach rozdziału 5 wraz z wynikami weryfikacji parametrów akustycznych.

W **rozdziale 6** przedstawiono analizę numeryczną MES stacjonarnego przepływu ciepła przez przegrodę. Obliczenia te przeprowadzono dla prototypu stropodachu o zoptymalizowanym układzie warstw, który został wyłoniony w ramach badań opisanych w rozdziale 3, oraz dla jego modyfikacji zaproponowanej w rozdziale 5. W analizach uwzględniono dodatkowe elementy mocujące (łączniki teleskopowe) oraz wpływ ich własności przewodzących na przenikanie ciepła przez przegrodę.

Badania, których wyniki przedstawiono w **rozdziałach od 2 do 6** dotyczyły wyłonienia optymalnego rozwiązania stropodachu spośród rozwiązań stosowanych obecnie przez firmę „Dach i Strych” oraz wskazania jego ulepszenia, co zostało zrealizowane przez zmianę materiału termoizolacyjnego z wełny mineralnej na piankę poliuretanową PUR.

Z kolei w **rozdziale 7** podjęto próbę oceny zaplecza technologicznego firmy „Dach i Strych” oraz zaproponowano zmiany zarówno w zakresie jego wyposażenia jak i modyfikacji linii produkcyjnej. Dodatkowo zaproponowano zmiany mogące w przyszłości zwiększyć autonomię firmy w zakresie badań materiałowych, jak również stanowić komponent w procesie kontroli jakości. Propozycje tych zmian finalnie mogą przyczynić się do ograniczenia kosztów pośrednich wynikających z konieczności prowadzenia badań przez jednostki zewnętrzne.

W ramach **rozdziału 8** przedstawiono informacje uzyskane w trakcie przeprowadzonych przez autorów opracowania wizji lokalnych wybranych obiektów na terenie Krakowa, podczas inwestycji wykonywanych przez firmę „Dach i Strych”. Spostrzeżenia wyniesione z obserwacji prac budowlanych pozwoliły na ocenę w zakresie zachowania norm bezpieczeństwa pracy, jak również wpływu na środowisko.

W **rozdziale 9** przedstawiono najważniejsze wnioski uzyskane w ramach analiz, które stanowią treść rozdziałów od 2 do 8.

Opracowanie zamykają **załączniki 1 i 2**, które zawierają szczegółowe wyniki badań opisanych w rozdziale 3.

1.3. Podstawy opracowania

Pracę wykonano na podstawie poniżej wymienionych materiałów źródłowych:

1. Dyrektywa 2002/91/EC Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 grudnia 2002 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków.
2. Laskowski L., 2008 r.: Ochrona cieplna i charakterystyka energetyczna budynku. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
3. Zakrzewski T., 2003 r.: Zagadnienia fizykalne w budownictwie. Wydaw. Politechniki Śląskiej.
4. Prawo Budowlane, 1994: Ustawa Prawo budowlane z dnia 7 lipca 1994 r. (Dz. U. z 2016 r. poz. 290) z późniejszymi zmianami.
5. Warunki techniczne, 2002: Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. (Dz.U.2002.75.690) z późniejszymi zmianami.
6. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku i lokalu mieszkalnego lub części budynku stanowiącej samodzielną część techniczno-użytkową oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw ich charakterystyki energetycznej (Dz.U. z 2008 r. Nr 201 poz. 1240).
7. PN-EN ISO 6946, 2008: Komponenty budowlane i elementy budynku -- Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
8. Dokumentacja techniczna „Dach i Strych” sp. z o.o. Przykłady zastosowania zaczepów kątowny ZK 3, ZK4.

9. Dokumentacja techniczna „Dach i Strych” sp. z o.o. Karta techniczna nr 1 – specyfikacja techniczna zacze­pów kątowych ZK. „Dach i Strych” sp. z o.o.
10. Dokumentacja techniczna „Dach i Strych” sp. z o.o. Przykład mocowania zacze­pów ką­to­wy ZK 3, ZK4.
11. Informacje uzyskane w „Dach i Strych” Sp. z o.o. z siedzibą w Krakowie.
12. Dokumentacja techniczna „Dach i Strych” sp. z o.o. Formularz nr F/02/KJ/5.10/01. Ba­da­nia obciążeniowe wyrobów metalowych w temperaturze otoczenia. Niszczące bada­nia wytrzymałościowe zacze­pów Zk-1, 2, 3 i 4.
13. http://www.kameratermowizyjna.com/Fliir_kamery_T620_T640_T620bx_T640bx.html
14. <https://www.isover.pl/produkty/dachoterm-sl-37>
15. APROBATA TECHNICZNA ITB AT-15-8678/2011. Zestaw wyrobów do wykonywania warstwowych przekryć dachowych DWW TYTANIUM PRUSZYŃSKI z izolacją cieplną z wełny mineralnej. ITB. Warszawa, 2011.
16. Punto-Pruszyński. System Tytanium Pruszyński. Dokumentacja techniczna.
17. Systemy Kalzip. Podręcznik techniki, planowania i konstrukcji.
18. Wizja lokalna ul. Rakowicka 29 (sierpień – listopad 2017)
19. Wizja lokalna ul. Pijarska 1 (marzec – lipiec 2017)
20. <http://www.vedag.com.pl/rozwiązania/85-dach/pokrycie-z-blachy>
21. Dokumentacja techniczna „Dach i Strych” sp. z o.o. Klasyfikacja w zakresie odporności ogniowej nr LBO-188-K/11. Przekrycie dachu „DiS System” produkcji firmy „Dach i Strych” sp. z o.o.
22. Dokumentacja techniczna „Dach i Strych” sp. z o.o. Deklaracja własności użytkowych nr 1/2017
23. Dokumentacja techniczna „Dach i Strych” sp. z o.o. Deklaracja własności użytkowych nr 2/2017
24. Dokumentacja techniczna „Dach i Strych” sp. z o.o. Deklaracja własności użytkowych nr 3/2017
25. Dokumentacja techniczna „Dach i Strych” sp. z o.o. Deklaracja własności użytkowych nr 4/2017
26. Dokumentacja techniczna „Dach i Strych” sp. z o.o. Deklaracja własności użytkowych nr 5/2017
27. <http://www.paroc.pl/Produkty>
28. http://www.plyty-abo.pl/plyty_warstwowe_dachowe_welna_mineralna.php
29. <https://www.balex.eu/plyty-warstwowe>
30. <http://www.pruszynski.com.pl>
31. https://kalzip.en.ecplaza.net/products/kalzip-liner-roof-system_2923680
32. http://www.purterm.eu/piana_poliuretanowa.html
33. Cichoń C., 2005 r.: Metody obliczeniowe: wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Poli­techniki Świętokrzyskiej.
34. PN-EN ISO 12524:2003. Materiały i wyroby budowlane. Właściwości cieplno-wilgotnościowe. Tabelaryczne wartości obliczeniowe.
35. PN-91/B-02020. Ochrona cieplna budynków - Wymagania i obliczenia.
36. PN-B-02151-3:2015-10 Akustyka budowlana - Ochrona przed hałasem w budynkach - Część 3: Wymagania dotyczące izolacyjności akustycznej przegród w budynkach i ele­mentów budowlanych.
37. <http://www.muffatopresse.com/PL>

38. <http://www.muffatopresse.com/PL/Presse2.asp>
39. http://www.dimac.co.jp/Products_J.en_US.html
40. <http://www.muffatopresse.com/PL/Svolgitori.asp>
41. <http://www.metalelekcie.pl/badanie-odpornosci-na-korozje-w-komorze-solnej>
42. <http://www.instron.pl/pl-pl/products/testing-systems/universal-testing-systems/static-hydraulic/dx/dx>
43. https://www.tatasteelconstruction.com/en_GB/
44. PN-B-02151-02:1987 Akustyka budowlana - Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach - Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach.
45. PN-EN ISO 717-1:2013-08 Akustyka - Ocena izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych - Część 1: Izolacyjność od dźwięków powietrznych
46. Duch W., Korbicz J., Rutkowski L., Tadeusiewicz R., 2000: Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna 2000. red. Maciej Nałęcz. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT. Warszawa.
47. Osowski S., 2006: Sieci neuronowe do przetwarzania informacji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
48. Rutkowski L., 2005: Metody i techniki sztucznej inteligencji. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa.
49. Łęski J. 2008: Systemy neuronowo-rozmyte. WNT, Warszawa.
50. Burges C.J.C., 1998: A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2, 121–167 (1998). 1998 Kluwer Academic Publishers. Boston.
51. Schölkopf B., Smola A.J., 2002: *Learning with Kernels*. MIT Press. Cambridge, Massachusetts.
52. Vapnik V., 1998: *Statistical learning theory*. John Wiley & Sons, New York.
53. Jankowski N., 2003: *Ontogeniczne sieci neuronowe*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.
54. Bi J., Bennet K., Enbrechts M.J, Breneman C.M, Song M., 2003: Dimensionality Reduction via Sparse Support Vector Machines.
55. Jankowski N., Grabczewski K., 2003: Toward optimal SVM. The third IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications, Anaheim, Calgary, Zurich. The International Association of Science and Technology for Development, ACTA Press.
56. Górecki H. 2006: *Optymalizacja i sterowanie systemów dynamicznych*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Kraków.
57. Suykens J.A.K., Van Gestem T., De Brabanter J., De Moor B., Vandewalle J. 2002: *Least squares support vector machines*. World Scientific, Singapore.
58. Chang C-C., Lin C-J., 2008: LIBSVM: a Library for Support Vector Machine. Software available at: <http://www.csie.nyu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.
59. Ostanin A., 2007: *Informatyka z matlabem*. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej. Białystok.
60. Matlab: Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox. 1984-2007: The MathWorks, Inc.

Formalną podstawą wykonania pracy była umowa z dnia 31.01.2017 r. zawarta pomiędzy DACH I STRYCH Sp. z o.o. a Akademią Górniczo - Hutniczą im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Przedmiot umowy: „Opracowanie ulepszonej technologii budowy warstwowych pokryć dachowych”.

2. SPECYFIKACJA TECHNICZNA PROTOTYPOWEGO ROZWIĄZANIA STROPODACHU FIRMY „DACH I STRYCH” SP. Z O.O.

Technologia „DiS system” to przykład lekkiego warstwowego stropodachu pełnego. W ramach tej technologii możliwych jest kilka wariantów rozwiązań w zależności od rodzaju zastosowanych materiałów oraz parametrów geometrycznych poszczególnych elementów składowych. Przewidziano możliwość mocowania przekrycia do różnych pod względem technologiczno-materiałowym elementów konstrukcyjnych budynku.

W analizie uwzględniono 6 podstawowych wariantów rozwiązań geometryczno-materiałowych wierzchniej warstwy stropodachu czyli pokrycia dachowego z płaskiej blachy do felcowania [21]:

WARIANT 1 i 2. Aluminiowa blacha płaska, grubości 0,7 i 0,8 mm.

WARIANT 3 i 4. Stalowa ocynkowana blacha płaska, grubości 0,7 i 0,8 mm.

WARIANT 5 i 6. Tytanowo-cynkowa blacha płaska, grubości 0,7 i 0,8 mm.

Rozwiązania te zestawiono w tabelach 2.1 do 2.6. Na rysunku 1.1 przedstawiono ogólny schemat pokrycia dachowego, który odzwierciedla technologię stosowaną przez firmę „Dach i Strych” stosowaną w rozwiązaniu stropodachu o nazwie „DiS system”.

Tabela 2.1.

Zestawienie warstw wraz ze specyfikacją techniczną stropodachu „DiS system” – WARIANT 1 [21]

	Warstwa/element	Specyfikacja
WARIANT 1	Aluminiowa płaska blacha do felcowania	grubość: 0,7 mm
	Zaczepty (stałe i ruchome) do mocowania blach na rąbek	ZK-3 i ZK-4
	Membrana dachowa paroprzepuszczalna	125÷180 g/m ²
	Łącznik teleskopowy łączący wierzchnią blachę aluminiową z blachą trapezową, przechodzący przez warstwę wełny mineralnej	GOK-185
	Wkręt do blachy trapezowej łączący element teleskopowy z blachą trapezową	WO48060
	Pakiet wełny mineralnej	grubość: min. 200 mm gęstość: min. 110 kg/m ²
	Paroizolacja z foli polietylenowej (PE)	grubość: 0,2 mm
	Blacha trapezowa	T135, grubość: 1,0 mm

Tabela 2.2.

Zestawienie warstw wraz ze specyfikacją techniczną stropodachu „DiS system” –
WARIANT 2 [21]

	Warstwa/element	Specyfikacja
WARIANT 2	Aluminiowa płaska blacha do felcowania	grubość: 0,8 mm
	Zaczepy (stałe i ruchome) do mocowania blach na rąbek	ZK-3 i ZK-4
	Membrana dachowa paroprzepuszczalna	125÷180 g/m ²
	Łącznik teleskopowy łączący wierzchnią blachę aluminiową z blachą trapezową, przechodzący przez warstwę wełny mineralnej	GOK-185
	Wkręt do blachy trapezowej łączący element teleskopowy z blachą trapezową	WO48060
	Pakiet wełny mineralnej	grubość: min. 200 mm
		gęstość: min. 110 kg/m ²
	Paroizolacja z foli polietylenowej (PE)	grubość: 0,2 mm
	Blacha trapezowa	T135, grubość: 1,0 mm

Tabela 2.3.

Zestawienie warstw wraz ze specyfikacją techniczną stropodachu „DiS system” –
WARIANT 3 [21]

	Warstwa/element	Specyfikacja
WARIANT 3	Stalowa ocynkowana płaska blacha do felcowania	grubość: 0,7 mm
	Zaczepy (stałe i ruchome) do mocowania blach na rąbek	ZK-3 i ZK-4
	Membrana dachowa paroprzepuszczalna	125÷180 g/m ²
	Łącznik teleskopowy łączący wierzchnią blachę aluminiową z blachą trapezową, przechodzący przez warstwę wełny mineralnej	GOK-185
	Wkręt do blachy trapezowej łączący element teleskopowy z blachą trapezową	WO48060
	Pakiet wełny mineralnej	grubość: min. 200 mm
		gęstość: min. 110 kg/m ²
	Paroizolacja z foli polietylenowej (PE)	grubość: 0,2 mm
	Blacha trapezowa	T135, grubość: 1,0 mm

Tabela 2.4.

Zestawienie warstw wraz ze specyfikacją techniczną stropodachu „DiS system” –
WARIANT 4 [21]

	Warstwa/element	Specyfikacja
WARIANT 4	Stalowa ocynkowana płaska blacha do felcowania	grubość: 0,8 mm
	Zaczepy (stałe i ruchome) do mocowania blach na rąbek	ZK-3 i ZK-4
	Membrana dachowa paroprzepuszczalna	125÷180 g/m ²
	Łącznik teleskopowy łączący wierzchnią blachę aluminiową z blachą trapezową, przechodzący przez warstwę wełny mineralnej	GOK-185
	Wkręt do blachy trapezowej łączący element teleskopowy z blachą trapezową	WO48060
	Pakiet wełny mineralnej	grubość: min. 200 mm
		gęstość: min. 110 kg/m ²
	Paroizolacja z foli polietylenowej (PE)	grubość: 0,2 mm
	Blacha trapezowa	T135, grubość: 1,0 mm

Tabela 2.5.

Zestawienie warstw wraz ze specyfikacją techniczną stropodachu „DiS system” –
WARIANT 5 [21]

	Warstwa/element	Specyfikacja
WARIANT 5	Tytanowo-cynkowa płaska blacha do felcowania	grubość: 0,7 mm
	Zaczepy (stałe i ruchome) do mocowania blach na rąbek	ZK-3 i ZK-4
	Mata rozdzielcza	290÷310 g/m ²
	Membrana dachowa paroprzepuszczalna	125÷180 g/m ²
	Łącznik teleskopowy łączący wierzchnią blachę aluminiową z blachą trapezową, przechodzący przez warstwę wełny mineralnej	GOK-185
	Wkręt do blachy trapezowej łączący element teleskopowy z blachą trapezową	WO48060
	Pakiet wełny mineralnej	grubość: min. 200 mm
		gęstość: min. 110 kg/m ²
	Paroizolacja z foli polietylenowej (PE)	grubość: 0,2 mm
Blacha trapezowa	T135, grubość: 1,0 mm	

Tabela 2.6.

Zestawienie warstw wraz ze specyfikacją techniczną stropodachu „DiS system” –
WARIANT 6 [21]

	Warstwa/element	Specyfikacja	
WARIANT 6	Tytanowo-cynkowa płaska blacha do felcowania	grubość: 0,8 mm	
	Zaczepty (stałe i ruchome) do mocowania blach na rąbek	ZK-3 i ZK-4	
	Mata rozdzielcza	290÷310 g/m ²	
	Membrana dachowa paroprzepuszczalna	125÷180 g/m ²	
	Łącznik teleskopowy łączący wierzchnią blachę aluminiową z blachą trapezową, przechodzący przez warstwę wełny mineralnej	GOK-185	
	Wkręt do blachy trapezowej łączący element teleskopowy z blachą trapezową	WO48060	
	Pakiet wełny mineralnej		grubość: min. 200 mm
			gęstość: min. 110 kg/m ²
	Paroizolacja z foli polietylenowej (PE)		grubość: 0,2 mm
	Blacha trapezowa		T135, grubość: 1,0 mm

Wyszczególnione w tabelach 2.1 do 2.6 zaczepty kątowe ZK-3 oraz ZK-4 są produkowane przez firmę „Dach i Strych” w oparciu o specjalnie opracowaną technologię. Całą gamę dostępnych elementów uzupełniają dodatkowo zaczepty ZK-1 oraz ZK-2. W tabeli 2.7 zawarto specyfikację tych elementów w kontekście ich zastosowania. Wszystkie zaczepty są produkowane ze stali nierdzewnej gatunku PN: H17, AISI: 430, DIN:1.4016, EUR:X6Cr17 grubości 0,4 mm [22, 23, 24, 25, 26]. Na rysunkach od 2.1 do 2.4 przedstawiono schematy geometryczne poszczególnych zaczeptów wraz z podaniem wymiarów.

Dla zaczeptów typu ZK została zbadana wytrzymałości na rozciąganie. Wartości średnie wytrzymałości uzyskane w próbie statycznego rozciągania wynoszą [12]:


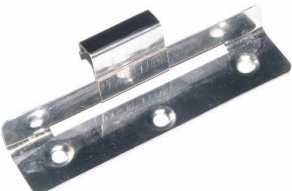


- element typu ZK-1: 1,58kN ± 5N,
- element typu ZK-2: 0,93kN ± 5N,
- element typu ZK-3: 1,30kN ± 5N,
- element typu ZK-4: 0,33kN ± 5N.

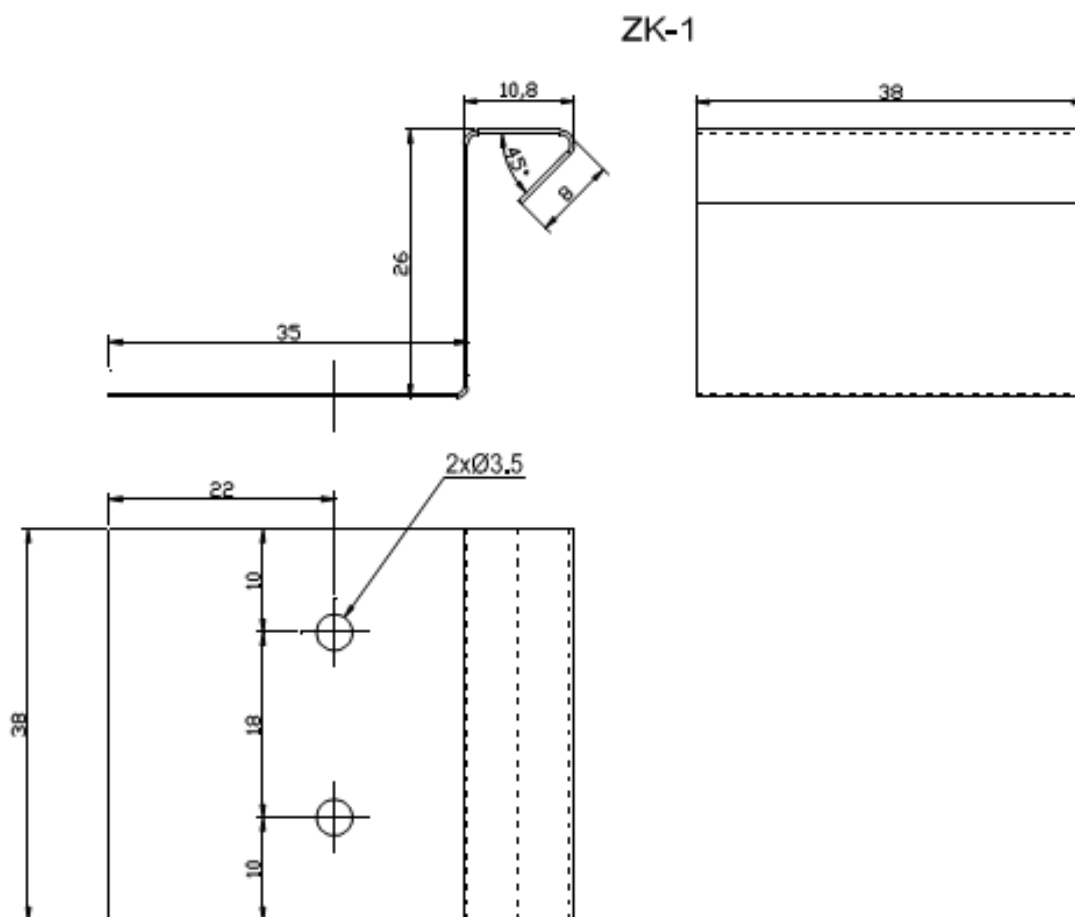
Przedstawione w tabelach od 2.1 do 2.6 warianty rozwiązań stropodachów stanowiły bazę do obliczeń współczynnika przenikania ciepła U [W/m²K]. W ramach każ-

dego rozwiązania, przeprowadzono obliczenia przy stopniowaniu grubości warstw termoizolacyjnych stosowanych przez firmę „Dach i Strych” w trakcie realizacji budów.

Tabela 2.7.

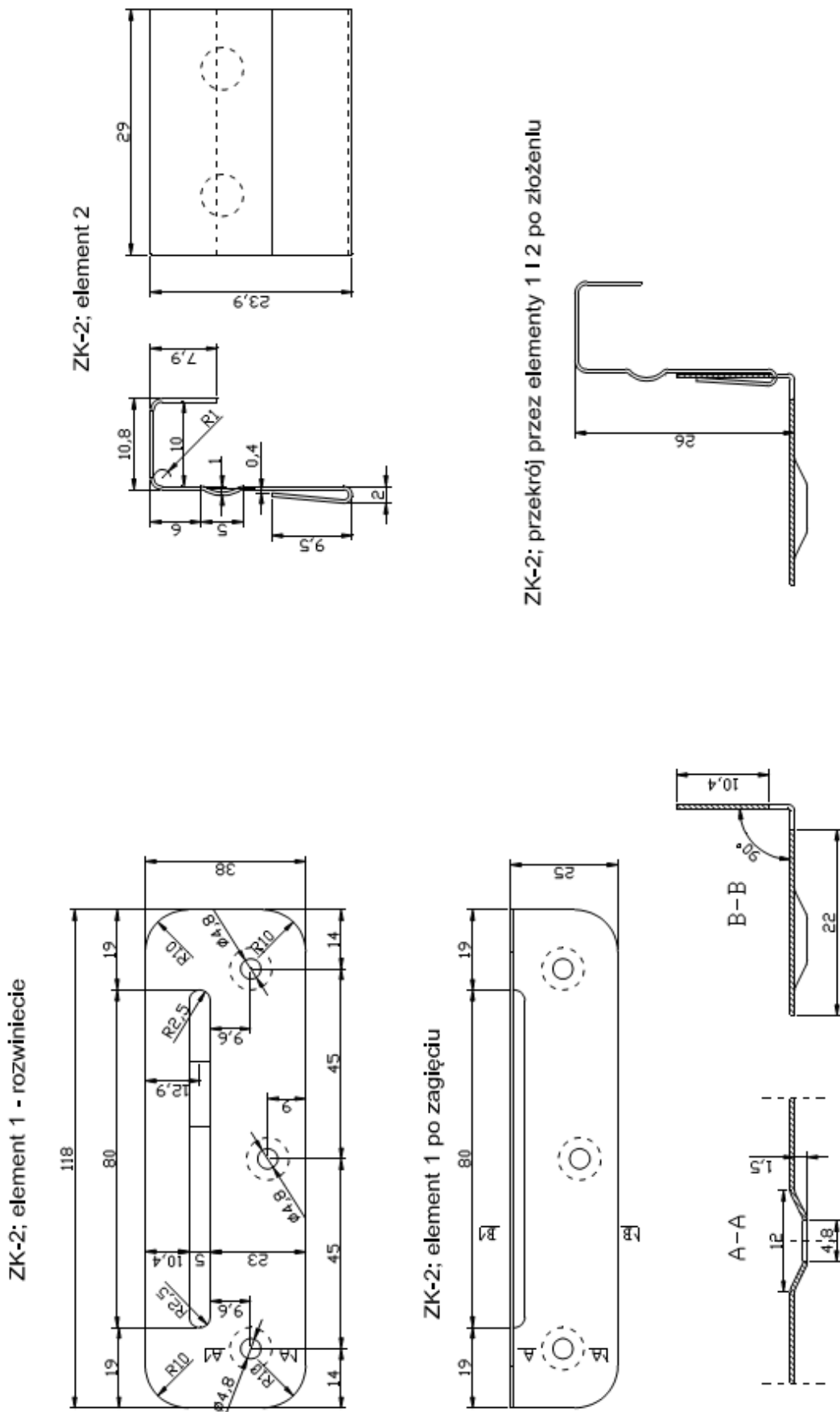
Specyfikacja techniczna zaczepów kątowych ZK-1,2,3 i 4 [9]

Nazwa zaczepu	Typ	Zastosowanie	Ilustracja
ZK-1	zaczep stały (zamocowanie nienrzesuwne)	mocowanie na podłożach twardych (blachy trapezowe, deskowanie, płyty OSB itp.)	
ZK-2	zaczep ruchomy (zamocowanie przesuwne)	mocowanie na podłożach twardych (blachy trapezowe, deskowanie, płyty OSB itp.)	
ZK-3	zaczep stały (zamocowanie nieprzesuwne)	mocowanie na podłożach miękkich (wełna mineralna twarda, styropian, pianka poliuretanowa itp.)	
ZK-4	zaczep ruchomy (zamocowanie przesuwne)	mocowanie na podłożach miękkich (wełna mineralna twarda, styropian, pianka poliuretanowa itp.)	



Rys. 2.1. Schemat geometryczny zaczepu kątownego – ZK-1 [9]

Zaczepy kątowe ZK-1, 2, 3 i 4 wraz z łącznikami teleskopowymi GOK-185 stosowane w stropodachu *DiS System* pozwalają na efektywne mocowanie pokrycia z płaskich blach łączonych na rąbek pionowy z podłożem (przekryciem), które najczęściej stanowi blacha trapezowa. Aby wyeliminować ewentualne negatywne efekty podrywania pokrycia dachowego spowodowanego ssaniem wiatru, firma „Dach i Strych” w karcie technicznej nr 1 [9] podaje zalecenia dotyczące liczby i rozstawu łączników przypadających na metr kwadratowy powierzchni dachu. Rozmieszczenie i liczba zaczepów kątowych ZK-1, 2, 3 i 4 uzależniona jest od szerokości taśmy, grubości blachy wierzchniej warstwy pokrycia oraz od charakterystycznej wartości ssania wiatru. Wariantowość stosowanych rozwiązań przedstawiono w tabeli nr 8 i 9.



Rys. 2.2. Schemat geometryczny złącza kąтового – ZK-2 [9]

Tabela 2.8.

Zalecenia dotyczące rozmieszczenia zaczepów ZK-1, 2 i 3 [9]

szerokość taśmy [mm]	500		550		600		650		700		800	
grubość blachy [mm]	0,7		0,7		0,7		0,7		0,7		0,8	
Obciążenie charakterystyczne ssania wiatru [kN/m ²]	ilość zaczep. [szt/m ²]	rozstaw zaczep. [mm]	ilość zaczep. [szt/m ²]	rozstaw zaczep. [mm]	ilość zaczep. [szt/m ²]	rozstaw zaczep. [mm]	ilość zaczep. [szt/m ²]	rozstaw zaczep. [mm]	ilość zaczep. [szt/m ²]	rozstaw zaczep. [mm]	ilość zaczep. [szt/m ²]	rozstaw zaczep. [mm]
0,25	4	500	4	500	4	500	4	500	4	500	4	400
0,5	4	500	4	500	4	500	4	500	4	500	4	400
0,75	4	500	4	500	4	500	4	500	4	500	4	400
1	4	500	4	500	4	500	4	500	4	500	4	400
1,25	4	500	4	500	4	500	4	500	6	450	6	300
1,5	4	500	4	500	4	400	4	400	6	400	6	300
1,75	6	500	6	450	6	350	6	350	6	300	8	250
2	6	450	6	400	6	300	6	300	8	300	8	200
2,25	6	400	6	350	6	300	6	250	8	250		
2,5	7	450	7	300	7	250	7	250	8	200		
2,75	8	300	8	250	8	200	8	200				
3	8	300	8	250	8	200	8	200				
3,25	8	250	8	200	8	200	8	200				
3,5	10	250	10	200	10	150	10	150				
3,75	10	200	10	200	10	150						
4	11	200	11	200	11	150						
4,25	12	200	12	150	12	150						
4,5	12	200	12	150	12	100						
4,75	13	150	13	150	13	100						
5	13	150	13	150	13	100						

Tabela 2.8.

Zalecenia dotyczące rozmieszczenia zaczepów ZK-4 [9]

szerokość taśmy [mm]	500		550		600		650		700		800	
grubość blachy [mm]	0,7		0,7		0,7		0,7		0,7		0,8	
Obciążenie charakterystyczne ssania wiatru [kN/m ²]	ilość łapek [szt/m ²]	rozstaw łapek [mm]	ilość łapek [szt/m ²]	rozstaw łapek [mm]	ilość łapek [szt/m ²]	rozstaw łapek [mm]	ilość łapek [szt/m ²]	rozstaw łapek [mm]	ilość łapek [szt/m ²]	rozstaw łapek [mm]	ilość łapek [szt/m ²]	rozstaw łapek [mm]
0,25	4	500	4	500	4	500	4	500	4	500	4	400
0,5	4	500	4	500	4	450	4	400	4	400	4	300
0,75	5	450	5	400	5	400	5	300	5	300	5	250
1	7	300	7	300	7	250	7	200	7	200	7	200
1,25	9	250	9	200	9	150	9	200	9	150	9	150
1,5	10	200	10	200	10	150	10	150	10	150	10	100
1,75	12	200	12	150	12	150	12	150	12	100	12	100
2	13	150	13	150	13	100	13	100	13	100	13	100

3. WYNIKI OBLICZEŃ WSPÓŁCZYNNIKA PRZENIKANIA CIEPŁA DLA PROTOTYPOWEGO STROPODACHU „DiS SYSTEM”

3.1. Procedura wyznaczania współczynnika przenikania ciepła dla warstwowej przegrody poziomej

Do oceny cieplnej budowlanych przegród zewnętrznych służy współczynnik przenikania ciepła U [$W/(m^2 \cdot K)$]. Wyraża on stosunek gęstości ustalonego strumienia ciepła do różnicy temperatury powietrza panującej po obu stronach przegrody w warunkach obliczeniowych.

Sposoby określania tego współczynnika precyzuje norma [7] Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.

Zgodnie z w/w normą współczynnik przenikania ciepła U oblicza się ze wzoru:

$$U = U_0 + \Delta U, \quad [W/(m^2 \cdot K)]$$

w którym:

U_0 – współczynnik przenikania ciepła określony bez uwzględnienia wpływu liniowych mostków termicznych przy założeniu jednorodności termicznej wszystkich warstw składowych przegrody, obliczany ze wzoru:

$$U_0 = \frac{1}{R_t}, \quad [W/(m^2 \cdot K)]$$

R_t – całkowity opór cieplny przegrody składającej się z dowolnej liczby warstw materiałowych lub powietrznych, prostopadłych do kierunku przepływu ciepła, $m^2 \cdot K/W$;

ΔU – człon korekcyjny, stanowiący poprawkę z uwagi na nieszczelności w warstwie izolacji termicznej oraz mostki punktowe, a w przypadku dachu o odwróconym układzie warstw – także z uwagi na wpływ opadów atmosferycznych, $W/m^2 \cdot K$.

Całkowity opór cieplny R_t oblicza się ze wzoru:

$$R_t = R_{si} + \sum_{j=1}^n R_j + R_{se}, \quad [(m^2 \cdot K)/W]$$

przy czym:

R_{si} – obliczeniowy opór przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej,

- R_j – opór cieplny j -tej jednorodnej cieplnie warstwy przegrody budowlanej, $m^2 \cdot K/W$;
 R_{se} – obliczeniowy opór przyjmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej, $m^2 \cdot K/W$.

W przypadku pojedynczej warstwy materiałowej jej opór cieplny oblicza się ze wzoru:

$$R_j = \frac{d_j}{\lambda_j}, \quad [(m^2 \cdot K)/W]$$

w którym:

- d_j – grubość j -tej jednorodnej warstwy materiałowej, m;
 λ_j – obliczeniowy współczynnik przewodzenia ciepła przez materiał j -tej warstwy, $W/m \cdot K$.

Według Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 5 lipca 2013 r. zmieniającego rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [5], wartości współczynnika przenikania ciepła U dla stropodachów, od 01.01.2021 r. nie może być większa niż wartości $U_{max} = 0,15 W/(m^2 \cdot K)$ według tabeli 3.1.

Tabela 3.1.

Wartości współczynnika przenikania ciepła U_{max} [5]

Lp.	Rodzaj przegrody i temperatura w pomieszczeniu	Współczynnik przenikania ciepła U_{max} [W/(m ² ·K)]			
		od 01.01. 2009 r.	od 01.01 2014 r.	od 01.01 2017 r.	od 01.01 2021 r.
1	Ściany zewnętrzne przy $t_i \geq 16^\circ C$	0,30	0,25	0,23	0,20
2	Stropodachy przy $t_i \geq 16^\circ C$	0,25	0,20	0,18	0,15
3	Podłoga na gruncie przy $t_i \geq 16^\circ C$	0,45	0,30	0,30	0,30
4	Stropy nad piwnicami przy $t_i \geq 16^\circ C$	0,45	0,25	0,25	0,25

3.2. Przykład obliczeń dla wariantu stropodachu „DiS system”

W rozdziale tym przedstawiono procedurę wyznaczania współczynnika przenikania ciepła dla poziomej przegrody warstwowej na przykładzie wariantu stropodachu „DiS system”. Obliczenia zostały wykonane zgodnie z normą [7].

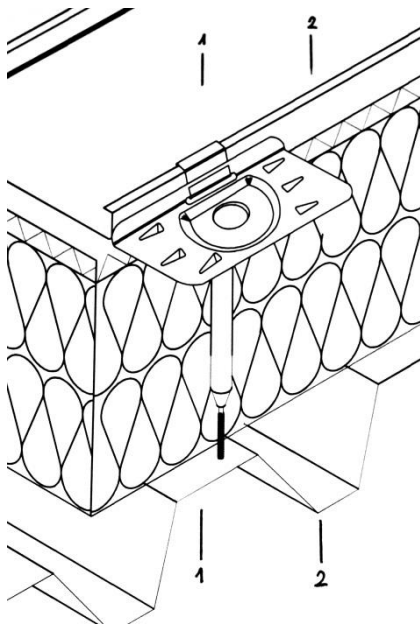
W tabeli 3.2 przedstawiono charakterystykę techniczną przyjętego wariantu rozwiązania lekkiego stropodachu warstwowego „DiS system”.

Tabela 3.2.

Charakterystyka techniczna przykładowego wariantu lekkiego stropodachu warstwowego „DiS system”

Stropodach warstwowy „DiS system” – WARIANT 1 (por. tab. 2.1)					
Nr	Warstwa	d_i	λ_i	R_i	Uwagi
		[m]	[W/m·K]	[m ² ·K/W]	
Środowisko zewnętrzne					
-	Opór przyjmowania ciepła na zewnętrznej stronie zewnętrznej, R_{se}	-	-	0,040	PN-EN ISO 6946:2008 pkt 5.2
1	Blacha aluminiowa do felcowania	0,0007	200	0,000	
2	Zaczepty ze stali nierdzewnej do mocowania blach ZK-3 i ZK-4	0,0004	17	0,000	PN-EN ISO 12524:2003 Str.23 wiersz 3
-	Teleskopowy łącznik dachowy z poliamidu typ GOK-185	-	-	-	PN-EN ISO6946: 2008 zał. D pkt 3.1 AT-15-9627/2016
3	Mata z włókna szklanego – Welon 120±6g/m ²	-	-	0,000	
4	Pakiet wełny mineralnej	0,2	0,038	5,263	$\rho_{min.}$ 110 kg/m ³ wartości z tab. materiałowej
5	Paroizolacja z folii PE	0,0002	-	0,000	
6	Pustka powietrzna	0,135	-	0,150	PN-EN ISO 6946:2008 tab. 2
7	Blacha trapezowa T135	0,001	58	0,000	
-	Wkręt do blachy trapezowej WO48060	-	-	-	PN-EN ISO6946: 2008 zał. D pkt 3.1 AT-15-9627/2016
-	Opór przyjmowania ciepła na zewnętrznej stronie wewnętrznej, R_{si}	-	-	0,100	PN-EN ISO 6946:2008 pkt 5.2

Wyznaczenie współczynników przenikania ciepła dla miarodajnych przekrojów konstrukcji złożonej (rys. 3.1):



Przekrój 1-1:

$$R_{11} = R_{se} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_7 + R_{si} = 5,403 \frac{m^2 K}{W}$$

$$U_{11} = \frac{1}{R_{11}} = 0,185 \frac{W}{m^2 K}$$

Przekrój 2-2:

$$R_{22} = R_{se} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_{si} = 5,553 \frac{m^2 K}{W}$$

$$U_{22} = \frac{1}{R_{22}} = 0,18 \frac{W}{m^2 K}$$

Rys. 3.1. Miarodajne przekroje wykorzystywane w obliczeniach konstrukcji złożonej

Współczynnik przenikania ciepła U dla przegród o złożonej konstrukcji:

$$U = \frac{U_{11} + U_{22}}{2} = 0,183 \frac{W}{m^2 K}$$

Obliczenie poprawionego współczynnika przenikania ciepła z uwagi na obecność łączników mechanicznych:

- a) Teleskopowy łącznik dachowy z poliamidu typ GOK-185

$$\lambda_{f1} = 0,25 \frac{W}{mK}$$

Zgodnie z zał. D pkt 3.1 normy [7], poprawki ze względu na łączniki mechaniczne nie stosuje się, jeśli współczynnik przewodzenia ciepła łącznika jest mniejszy niż 1 W/mK.

$$U_{f1} = 0,00 \frac{W}{m^2 K}$$

- b) Wkręt do blachy trapezowej WO48060

$$\lambda_{f2} = 58 \frac{W}{mK}$$

$$\phi_{f2} = 0,0048 \text{ m}$$

$$A_{f2} = 1,81 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$n_{max} = 13 \frac{\text{szt.}}{m^2}$$

$$n_{min} = 4 \frac{\text{szt.}}{m^2}$$

$$d_{f2} = 0,06 \text{ m}$$

$$d_4 = 0,2 \text{ m}$$

$$\alpha_{f2} = 0,8 \frac{d_{f2}}{d_4} = 0,24 \quad R_4 = 5,263 \frac{m^2 K}{W} \quad R_{11} = 5,403 \frac{m^2 K}{W}$$

$$\Delta U_{fmin} = \alpha \frac{\lambda_{f2} A_{f2} n_{min}}{d_4} \cdot \left(\frac{R_4}{R_{11}}\right)^2 = 0,005 \frac{W}{m^2 K}$$

$$\Delta U_{fmax} = \alpha \frac{\lambda_{f2} A_{f2} n_{max}}{d_4} \cdot \left(\frac{R_4}{R_{11}}\right)^2 = 0,016 \frac{W}{m^2 K}$$

$$U_c = U + \Delta U_{fmax} = 0,199 \frac{W}{m^2 K}$$

$$U_{max} = 0,15 \frac{W}{m^2 K}$$

W analizowanym przykładzie warunek normowy nie został spełniony.

3.3. Wyniki przeprowadzonych analiz

Zgodnie z specyfikacją techniczną opisaną w rozdziale 2.1 przeprowadzono wariantową analizę charakterystyk cieplnych przegrody. W badaniach uwzględniono różnicowanie wynikające z wymagań dotyczących rozmieszczenia łączników, grubości i typu blachy oraz najczęściej stosowanego typu termoizolacji w ramach systemu firmy „Dach i Strych”.

W tabeli 3.3 zestawiono wszystkie z 30 wariantów, dla których wyznaczano wartości współczynnika przenikania ciepła U [W/m²K] przyjmując stopniowanie w zakresie warstwy termoizolacyjnej równe $\Delta = 10$ mm.

Szczegółowe wyniki obliczeń zestawiono w tabelach Z1.1 ÷ Z1.30 w **Załączniku**

1.

Tabela 3.3.

Zestawienie wariantów wynikających z rozwiązań geometrycznych i materiałowych, dla których wyznaczano wartości współczynnika przenikania ciepła U [$W/(m^2K)$]

Rodzaj pokrycia	Termoizolacja	Stopniowanie grubości warstwy termoizolacyjnej [mm]
1	2	3
Blacha aluminiowa	Wariant: A-1-07 (0,7 mm) i A-1-07 (0,8 mm)	
	Isover „Srebrny Dach”	
	Dachoterm G 39 (40 mm)	
	Dachoterm SL 37 (60 ÷ 260 mm)	60 ÷ 260 mm [$\Delta = 10$ mm]
	Wariant: A-2-07 (0,7 mm) i A-2-07 (0,8 mm)	
	CB Rock	160 ÷ 300 mm [$\Delta = 10$ mm]
	Wariant: A-3-07 (0,7 mm) i A-3-07 (0,8 mm)	
	Paroc ROS	
	ROS 60 (50 mm)	-
	ROS 30 (100 ÷ 220 mm)	100 ÷ 220 mm [$\Delta = 10$ mm]
	Wariant: A-4-07 (0,7 mm) i A-4-07 (0,8 mm)	
	Paroc ROS	
	ROS 60 (80 mm)	-
	ROS 30 (100 ÷ 220 mm)	100 ÷ 220 mm [$\Delta = 10$ mm]
	Wariant: A-5-07 (0,7 mm) i A-5-07 (0,8 mm)	
	Paroc ROS	
	ROS 60 (100 mm)	-
	ROS 30 (100 ÷ 220 mm)	100 ÷ 220 mm [$\Delta = 10$ mm]

c. d. Tabela 3.3.

Zestawienie wariantów wynikających z rozwiązań geometrycznych i materiałowych, dla których wyznaczano wartości współczynnika przenikania ciepła U [$W/(m^2K)$]

1	2	3
Blacha stalowa ocynkowana	Wariant: S-1-07 (0,7 mm) i S-1-07 (0,8 mm)	
	Isover „Srebrny Dach”	
	Dachoterm G 39 (40 mm)	
	Dachoterm SL 37 (60 ÷ 260 mm)	60 ÷ 260 mm [$\Delta = 10$ mm]
	Wariant: S-2-07 (0,7 mm) i S-2-07 (0,8 mm)	
	CB Rock	160 ÷ 300 mm [$\Delta = 10$ mm]
	Wariant: S-3-07 (0,7 mm) i S-3-07 (0,8 mm)	
	Paroc ROS	
	ROS 60 (50 mm)	-
	ROS 30 (100 ÷ 220 mm)	100 ÷ 220 mm [$\Delta = 10$ mm]
	Wariant: S-4-07 (0,7 mm) i S-4-07 (0,8 mm)	
	Paroc ROS	
	ROS 60 (80 mm)	-
	ROS 30 (100 ÷ 220 mm)	100 ÷ 220 mm [$\Delta = 10$ mm]
	Wariant: S-5-07 (0,7 mm) i S-5-07 (0,8 mm)	
	Paroc ROS	
	ROS 60 (100 mm)	-
ROS 30 (100 ÷ 220 mm)	100 ÷ 220 mm [$\Delta = 10$ mm]	
Blacha tytanowo-cynkowa	Wariant: TC-1-07 (0,7 mm) i TC-1-07 (0,8 mm)	
	Isover „Srebrny Dach”	
	Dachoterm G 39 (40 mm)	
	Dachoterm SL 37 (60 ÷ 260 mm)	60 ÷ 260 mm [$\Delta = 10$ mm]
	Wariant: TC-2-07 (0,7 mm) i TC-2-07 (0,8 mm)	
	CB Rock	160 ÷ 300 mm [$\Delta = 10$ mm]
	Wariant: TC-3-07 (0,7 mm) i TC-3-07 (0,8 mm)	
	Paroc ROS	
	ROS 60 (50 mm)	-
	ROS 30 (100 ÷ 220 mm)	100 ÷ 220 mm [$\Delta = 10$ mm]
	Wariant: TC-4-07 (0,7 mm) i TC-4-07 (0,8 mm)	
	Paroc ROS	
	ROS 60 (80 mm)	-
	ROS 30 (100 ÷ 220 mm)	100 ÷ 220 mm [$\Delta = 10$ mm]
	Wariant: TC-5-07 (0,7 mm) i TC-5-07 (0,8 mm)	
	Paroc ROS	
	ROS 60 (100 mm)	-
ROS 30 (100 ÷ 220 mm)	100 ÷ 220 mm [$\Delta = 10$ mm]	

3.4. Wnioski przeprowadzonych analiz

W tabelach 3.4, 3.5 i 3.6. zestawiono wyniki końcowe dla przypadków granicznych, w których uzyskano najwyższe dopuszczalne wartości współczynnika przenikania ciepła U [W/m^2K]. W obliczeniach ujęto liczbę wymaganych łączników zgodnie z tabelami nr 2.8 i 2.9. Uzyskane wyniki odniesiono do kryteriów wynikających z [5] obowiązujących w okresie od 2017 do 2020 roku oraz od roku 2021.

Tabela 3.4.

Parametry geometryczne przegrody odpowiadające dopuszczalnym wartościom współczynnika przenikania ciepła dla wariantów zakładających blachę aluminiową o grubości 0,7 i 0,8 mm

Wariant	Dopuszczalna wartość współczynnika przenikania ciepła U [W/m^2K]	Analizowany okres czasowy	Odpowiadająca sumaryczna grubość izolacji termicznej [mm]	Odpowiadająca maksymalna liczba łączników
A-1-07	0,18	2017÷2020	210	8
	0,15	Od 2021	250	7
A-2-07	0,18	2017÷2020	210	9
	0,15	Od 2021	250	9
A-3-07	0,18	2017÷2020	210	11
	0,15	Od 2021	250	11
A-4-07	0,18	2017÷2020	210	9
	0,15	Od 2021	250	9
A-5-07	0,18	2017÷2020	210	8
	0,15	Od 2021	250	8
A-1-08	0,18	2017÷2020	210	8
	0,15	Od 2021	250	7
A-2-08	0,18	2017÷2020	210	9
	0,15	Od 2021	250	9
A-3-08	0,18	2017÷2020	210	11
	0,15	Od 2021	250	11
A-4-08	0,18	2017÷2020	210	9
	0,15	Od 2021	250	9
A-5-08	0,18	2017÷2020	210	8
	0,15	Od 2021	250	8

Tabela 3.5.

Parametry geometryczne przegrody odpowiadające dopuszczalnym wartościom współczynnika przenikania ciepła dla wariantów zakładających blachę stalową o grubości 0,7 i 0,8 mm

Wariant	Dopuszczalna wartość współczynnika przenikania ciepła U [W/m ² K]	Analizowany okres czasowy	Odpowiadająca sumaryczna grubość izolacji termicznej [mm]	Odpowiadająca maksymalna liczba łączników
S-1-07	0,18	2017÷2020	210	7
	0,15	Od 2021	250	7
S-2-07	0,18	2017÷2020	210	9
	0,15	Od 2021	250	9
S-3-07	0,18	2017÷2020	210	11
	0,15	Od 2021	250	11
S-4-07	0,18	2017÷2020	210	9
	0,15	Od 2021	250	9
S-5-07	0,18	2017÷2020	210	8
	0,15	Od 2021	250	8
S-1-08	0,18	2017÷2020	210	8
	0,15	Od 2021	250	7
S-2-08	0,18	2017÷2020	210	9
	0,15	Od 2021	250	9
S-3-08	0,18	2017÷2020	210	11
	0,15	Od 2021	250	11
S-4-08	0,18	2017÷2020	210	9
	0,15	Od 2021	250	9
S-5-08	0,18	2017÷2020	210	8
	0,15	Od 2021	250	8

We wszystkich wariantach uzyskano zgodność w kontekście minimalnej grubości warstwy termoizolacyjnej. W odniesieniu do kryteriów obowiązujących w okresie od 2017 do 2020 roku ustalono minimalną grubość termoizolacji wynoszącą 21 cm. Natomiast uwzględniając warunki, które będą obowiązywać od 2021 roku, minimalna grubość warstwy termoizolacyjnej wynosi 25 cm.

Tabela 3.6.

Parametry geometryczne przegrody odpowiadające dopuszczalnym wartościom współczynnika przenikania ciepła dla wariantów zakładających blachę tytanowo-cynkową o grubości 0,7 i 0,8 mm

Wariant	Dopuszczalna wartość współczynnika przenikania ciepła U [W/m ² K]	Analizowany okres czasowy	Odpowiadająca sumaryczna grubość izolacji termicznej [mm]	Odpowiadająca maksymalna liczba łączników
TC-1-07	0,18	2017÷2020	210	8
	0,15	Od 2021	250	7
TC-2-07	0,18	2017÷2020	210	9
	0,15	Od 2021	250	9
TC-3-07	0,18	2017÷2020	210	11
	0,15	Od 2021	250	11
TC-4-07	0,18	2017÷2020	210	9
	0,15	Od 2021	250	9
TC-5-07	0,18	2017÷2020	210	8
	0,15	Od 2021	250	8
TC-1-08	0,18	2017÷2020	210	8
	0,15	Od 2021	250	7
TC-2-08	0,18	2017÷2020	210	9
	0,15	Od 2021	250	9
TC-3-08	0,18	2017÷2020	210	11
	0,15	Od 2021	250	11
TC-4-08	0,18	2017÷2020	210	9
	0,15	Od 2021	250	9
TC-5-08	0,18	2017÷2020	210	8
	0,15	Od 2021	250	8

Uszczegóławiając wnioski z przeprowadzonych analiz o wpływ liczby łączników uzyskano wyniki świadczące na korzyść wariantu, w którym zastosowano termoizolację typu: **Paroc ROS /ROS 60 + ROS 30/** [27]. Biorąc pod uwagę, że łączniki stanowią potencjalną drogę strat ciepła przez przegrodę, jedynie w tym przypadku uzyskano wartość współczynnika przenikania ciepła niższą od wartości granicznej przy maksymalnej liczbie łączników (11 szt. /m²) – por. tab. 3.4, 3.5 i 3.6.

Kalibrowanie charakterystyki termicznej przegrody w stronę wyższych wartości współczynnika przenikania ciepła (do wartości dopuszczalnych) przyczynia się do obniżenia kosztów realizacji danego elementu. W przypadku wytypowanego wariantu nie ma dodatkowych przeciwwskazań związanych z ograniczeniem wymaganej liczby łączni-

ków. Dlatego też uznano, iż jest to najtrafniejszy wybór do powszechnego stosowania w ramach inwestycji planowanych do realizacji zarówno do roku 2020, jak i od roku 2021.

3.5. Wyznaczanie własności akustycznych analizowanej przegrody

Dla wstępnie wytypowanego rozwiązania, które jest optymalne w zakresie warunków termicznych zawartych w [5] określono jego własności akustyczne. Dysponując zestawem wyników badań laboratoryjnych dla stropodachów z układem warstw analogicznym do wytypowanego rozwiązania określono wartości wskaźników izolacyjności akustycznej R_w , R_{A1} , R_{A2} [36]. Wartości tych wskaźników dla stropodachu przy układzie warstw termoizolacyjnych zapewniających spełnienie warunków technicznych do końca 2020 roku, jak i od początku 2021 roku przedstawiono w tabeli 3.7.

Tabela 3.7.

Wartości wskaźników izolacyjności akustycznej dla wytypowanych przegród

Typ analizowanej przegrody	Wskaźnik izolacyjności akustycznej R_w	Wskaźnik izolacyjności akustycznej R_{A1}	Wskaźnik izolacyjności akustycznej R_{A2}
Paroc ROS 30 (50mm) + ROS 60 (160 mm)	44 dB	42 dB	35 dB
Paroc ROS 30 (50mm) + ROS 60 (200 mm)	46 dB	44 dB	38 dB

Uzyskane wyniki spełniają warunki techniczne określone w [5]. Natomiast dokładna ocena przydatności analizowanych rozwiązań stropodachu jest uzależniona od przeznaczenia obiektu budowlanego [36] oraz ekspozycji na ściśle określony poziom natężenia dźwięku A [44]. Dlatego ocenę taką można przeprowadzić dopiero w przypadku projektowania inwestycji o ściśle określonym przeznaczeniu i w określonym otoczeniu determinującym natężenie dźwięku.

Aby sprawdzić poprawność uzyskanych wyników z parametrami analogicznych materiałowo przegród stworzono bazę danych na podstawie informacji zawartych w katalogach różnych producentów. Baza ta obejmowała 150 różnych, acz zbliżonych konstrukcyjnie stropodachów, dla których producenci wyznaczy laboratoryjnie wartości wskaźnika izolacyjności akustycznej R_w . Z uwagi na fakt, iż wartość tego wskaźnika zależy od liczby warstw zastosowanych w przegrodzie, nie jest możliwe interpolowanie wprost jego wartości na bazie zgromadzonych danych. Dlatego w celu uzyskania informacji o wskaźnikach izolacyjności R_w dla wytypowanych przegród dachowych z ta-

beli 3.7 zdecydowano o budowie sieci neuronowej oraz modelu *Support Vector Machine* w ujęciu regresyjnym, tak aby w najdokładniejszy sposób odwzorować informacje zawartą w utworzonej bazie danych. Ta informacja z kolei pozwoliła na aproksymację wartości wskaźnik izolacyjności R_w .

3.6. Przyjęta metodyka badań do wyznaczania wskaźnika izolacyjności akustycznej z zastosowaniem wybranych metod sztucznej inteligencji

W tym miejscu przedstawiono główne kryteria wyboru metody pozwalającej na utworzenie modelu aproksymującego wartość parametru izolacyjności akustycznej R_w dla analizowanych przegród dachowych. W pierwszym podejściu skoncentrowano się na metodach jednokierunkowych sztucznych sieci neuronowych. Wybór rodziny tych metod był podyktowany takimi własnościami jak [46, 47, 48]:

- możliwością przedstawienia zagadnienia w wielowymiarowej dziedzinie zmiennych objaśniających,
- możliwością realizacji odwzorowania nieliniowego,
- brakiem konieczności doboru startowej formy odwzorowania,
- brakiem założeń w stosunku do jakości zgromadzonych danych wzorcowych (wymogi stawiane w klasycznych metodach aproksymacji w statystyce),
- możliwością generalizacji nabytej wiedzy w trakcie procesu uczenia.

Powyższe cechy stanowią o uniwersalności sieci neuronowych w kontekście rozwiązywania nieliniowych problemów wielowymiarowych [47].

Biorąc pod uwagę że rodzina sieci neuronowych jest bardzo szeroka, podjęto krok uściślający w celu wyłonienia metody najbardziej efektywnej w kontekście rozwiązywanego problemu. Wiodącymi kryteriami w tej części poszukiwań były:

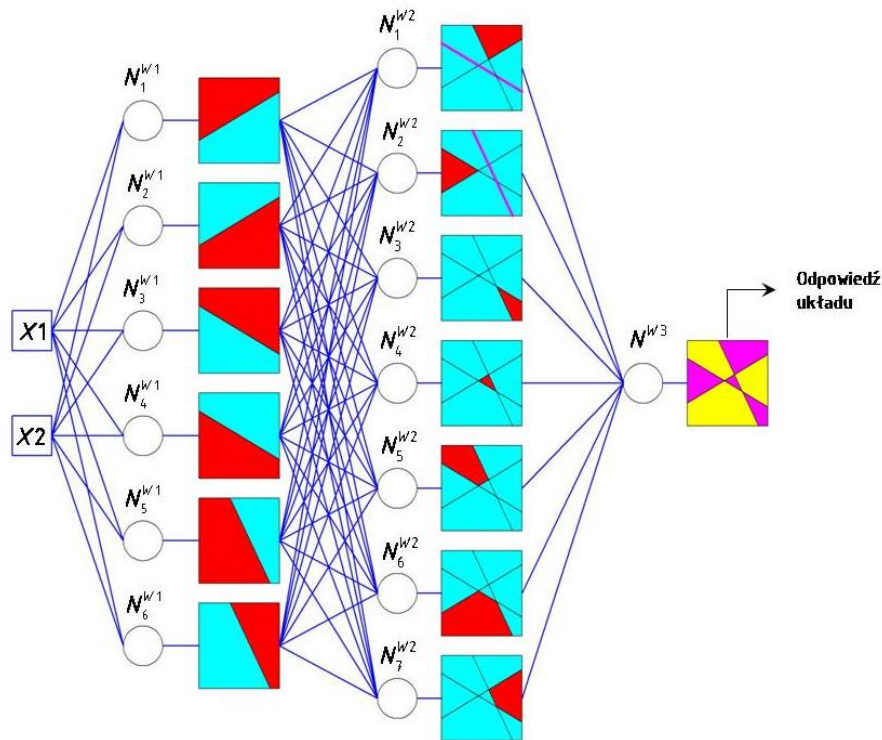
- stopień uogólniania nabytej wiedzy,
- jednoznaczność procesu uczenia,
- możliwość przeprowadzenia analizy wrażliwości względem utworzonego modelu.

Zakres poszukiwań poszerzono o pokrewne sieciom neuronowym metodę SVM („*Support Vector Machine*” [49]), które w konsekwencji wytypowano, jako najefektywniejsze w kontekście założonych kryteriów.

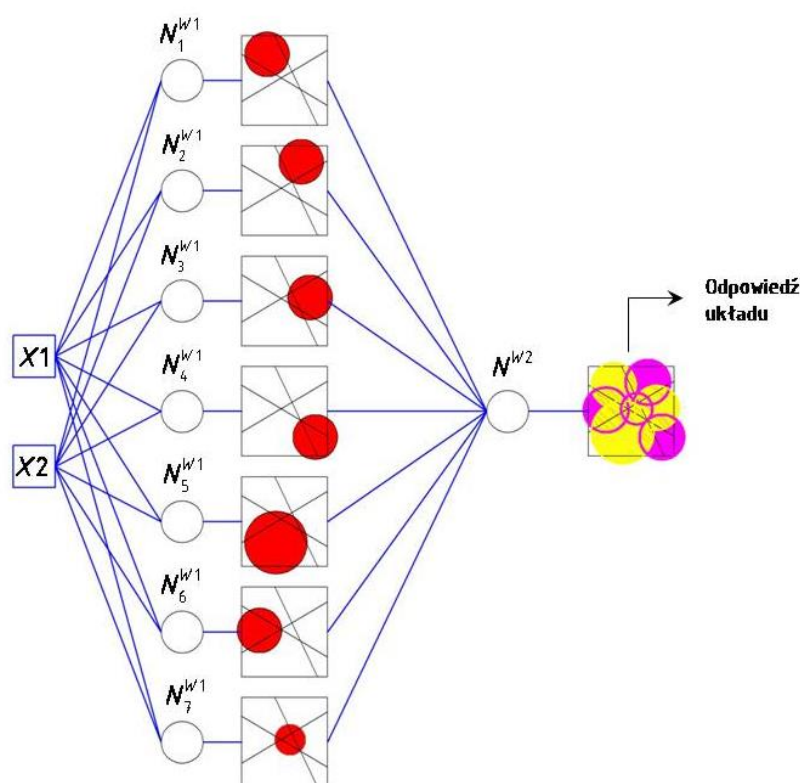
3.6.1. Porównanie sieci neuronowych i metody SVM

Podejście regresyjne metody „*Support Vector Machine (SVM)*”, zwane też ε -SVR [50, 51, 52], w kontekście struktury i działania ustalonego systemu staje się bardzo zbliżone do sieci neuronowych o radialnych funkcjach jądrowych (*RBF „Radial Basis Function Neural Network”*) [47, 49]. Różnica ujawnia się w podejściu związanym z uczeniem takich systemów jak i ustalaniu ich struktury. Na załączonych schematach (rys. 3.2 i 3.3) przedstawiono w sposób uproszczony działanie sieci neuronowych dla przypadku aproksymacji.

W typowych sieciach neuronowych proces uczenia, polegający na strojeniu wag synaptycznych pomiędzy neuronami, polega na iteracyjnej minimalizacji pewnej miary dopasowania, którą zazwyczaj jest średni błąd kwadratowy (*MSE – Mean Square Error*).



Rys. 3.2. Schemat działania nieliniowej sieci neuronowej dla przypadku aproksymacji (opracowanie własne)



Rys. 3.3. Schemat działania radialnej sieci neuronowej dla przypadku aproksymacji (opracowanie własne)

W celu zwiększenia stopnia generalizacji takich systemów podejmuje się szereg różnych działań, które sprowadzają się bądź to redefinicji funkcji błędu, prowadząc do ograniczenia wartości poszczególnych wag systemu, bądź też narzucają pewne warunki na złożoność ich struktury [47, 53]. W ogólności zabiegi modyfikujące funkcje celu wprowadzają kompromis, pomiędzy jakością dopasowania a uogólnianiem (generalizacją) systemu. Bazują one na rozwinięciu funkcji błędu o tzw. czynniki regularyzacyjne [47]. Czynniki te utożsamiać można z występującymi w zagadnieniach optymalizacji, tzw. funkcjami kary. Z kolei metody prowadzące do redukcji złożoności struktury sieci neuronowych bazują na analizie wrażliwości poszczególnych połączeń reprezentowanych przez wartości wag na ostateczną wartość zdefiniowanej miary dopasowania [46, 53].

Najczęściej jednak ustalanie złożoności struktury sztucznych sieci neuronowych jest zakładane arbitralnie a optymalny dobór liczby neuronów w warstwach ukrytych wymaga przeprowadzenia wielu niezależnych symulacji.

Należy podkreślić również, że postać funkcji celu wyrażona w dziedzinie wag systemu ma charakter wielomodalny. Dążąc do minimalizacji tak postawionego zadania, obierając pewien punkt startowy w procesie optymalizacji pojawia się problem

związany ze zbieżnością rozwiązania do minimów lokalnych a tym samym oscylacji (utknięcia iteracyjnego procesu minimalizacji) w obszarze tych minimów. W celu wyeliminowania takiej sytuacji nadaje się pewną bezwładność na przebieg procesu strojenia wartości wag systemu wprowadzając czynnik momentum [46]. Wprowadzenie takiego czynnika chroni proces optymalizacji zarówno przed utknięciem w obszarze lokalnego minimum jak również zabezpiecza przed opuszczeniem obszaru rozwiązania globalnego.

Zakwalifikowana do badań metoda SVM różni się od podejścia związanego z budową typowych sieci neuronowych w kilku kwestiach.

Pierwszą różnicą jest samoistna rozbudowa złożoności systemu zależna, w przypadku jąder radialnych, od trzech parametrów wyznaczających odpowiednio charakterystyki funkcji jąder (parametr σ), stopnia kompromisu pomiędzy dopasowaniem a generalizacją systemu (parametr C) oraz szerokości pasma tolerancji (parametr ϵ) [52].

Powyższe stałe są dobierane arbitralnie natomiast istnieją metody optymalnego doboru ich wartości [54, 55]. Możliwość doboru optymalnych parametrów C , ϵ i σ stanowi drugą ważną zaletę charakterystyczną dla metody SVM.

Kolejną zaletą metod wektorów podtrzymujących jest pozbycie się, wielomodalnej postaci hiperpowierzchni funkcji celu [47, 49]. Własność ta eliminuje możliwość oscylacji wokół minimów lokalnych, która to sytuacja ma miejsce w przypadku typowych sieci neuronowych. Tym samym eliminowana jest duża wrażliwość tych systemów na dobór punktu startowego w procesie optymalizacji. W odniesieniu do metody SVM powierzchnia funkcji celu jest jednomodalna, co jest wynikiem sprowadzenia procedury uczenia do zadania programowania kwadratowego [56]. Pojawiają się nawet sformułowania metody SVM, sprowadzające powierzchnię błędu do powierzchni pierwszego stopnia (Metoda „*Least Square Support Vector Machine – LSSVM* [57]). Ostatnią z zalet charakterystyczną dla metod wektorów podpierających jest ich mała wrażliwość na liczbę wzorców uczących. Metody te są, więc mniej podatne na zjawisko tzw. „klątwy wymiarowości”, która to ogranicza funkcjonowanie typowych sieci neuronowych [47]. Innymi słowy liczba wzorców uczących potrzebna do odwzorowania modelowanego zjawiska, przy odpowiednim poszerzeniu marginesu separacji, staje się niezależna od złożoności systemu [47, 49].

Podsumowując zarówno sztuczne sieci neuronowe jak i metody wektorów podpierających stanowią uniwersalne metody aproksymacji funkcji wielu zmiennych. W wielu przypadkach podanych w literaturze dokładność odwzorowania dla obydwu grup metod jest porównywalna. Natomiast sam proces budowy takich systemów cechuje się większą jednoznacznością eliminującą zewnętrzną ingerencję i nadzór projektanta.

W pracy zastosowano obie metody. Miało to na celu wyodrębnić model, który będzie cechował się najlepszymi własnościami dopasowania do zbioru danych o parametrach akustycznych w zbiorze treningowym, jak i odpowiednim poziomem generalizacji aproksymowanej wartości parametru R_w .

3.6.2. Opis metody SVM w ujęciu regresyjnym (ϵ -SVR)

W podejściu regresyjnym w metodzie SVM zapis poszukiwanej funkcji aproksymującej ma postać [47]:

$$y(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \varphi(\mathbf{x}) + b \quad (3.1)$$

gdzie: $\mathbf{x} \in R^n$ - jest wektorem danych wejściowych w przestrzeni n-wymiarowej,

$\varphi(\cdot): R^n \rightarrow R^{n_h}$ - jest pewną transformacją przekształcającą surowe dane wejściowe do tzw. przestrzeni cech systemu (feature space),

\mathbf{w}^T - jest wektorem wag.

Odwzorowanie $\varphi(\cdot): R^n \rightarrow R^{n_h}$ jest podawane w sposób niejawnny i jest efektem zastosowania funkcji jądra określonego typu (np.[50, 52]).

Podstawą do sformułowania problemu uczenia systemu SVM w ujęciu regresyjnym jest zdefiniowanie funkcji błędu minimalizowanej w procesie adaptacji. Dysponując pewnym zbiorem danych wzorcowych $\{\mathbf{x}_k, y_k\}_{k=1}^N$ funkcję kosztu dla pojedynczego wzorca zapisuje się jako (np.[50, 52]):

$$L_\epsilon(y_k, y(\mathbf{x}_k)) = \begin{cases} |y_k - y(\mathbf{x}_k)| - \epsilon & \text{dla } |y_k - y(\mathbf{x}_k)| \geq \epsilon \\ 0 & \text{dla } |y_k - y(\mathbf{x}_k)| \leq \epsilon \end{cases} \quad (3.2)$$

Powyższe sformułowanie nosi nazwę ϵ – niewrażliwej funkcji kosztu (ϵ – *insensitive loss function* [53]). W wyniku stosowania powyższej funkcji, narzucającej pewien margines tolerancji ϵ , podejście regresyjne z wykorzystaniem SVM zwykło nazywać się ϵ -SVR („ ϵ – Support Vector Regression” (np.[50, 51]).

Wprowadzenie takiej postaci funkcji błędu jest typowe dla tzw. metod odpornych na zakłócenia w danych bądź dane odstające (outliers) [49]. Ponadto pozwala na późniejsze sformułowanie problemu uczenia, jako zadania programowania kwadratowego [50], co jest jedną z głównych zalet metody ε -SVR.

Dysponując ustaloną funkcją błędu dla pojedynczego wzorca (3.2) zapisuje się funkcję celu, za minimalizacją której będzie podążać proces uczenia:

$$\min_{\mathbf{w}, b, \xi_k^*, \xi_k} J(\mathbf{w}, \xi_k^*, \xi_k) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + C \sum_{k=1}^N (\xi_k^* + \xi_k), \quad k = 1 \dots N \quad (3.3)$$

Przy nierównościowych ograniczeniach funkcyjnych:

$$\begin{cases} y_k - \mathbf{w}^T \varphi(\mathbf{x}_k) - b \leq \varepsilon + \xi_k \\ \mathbf{w}^T \varphi(\mathbf{x}_k) + b - y_k \leq \varepsilon + \xi_k^* \\ \xi_k, \xi_k^* \geq 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Powyższy zapis jest tzw. pierwotnym problemem minimalizacji funkcji przy ograniczeniach nierównościowych (np.[56]).

Tak postawiony problem wprowadza kompromis pomiędzy generalizacją, a jakością dopasowania aproksymatora wyrażonego w postaci (5.2).

Człon $\sum_{k=1}^N (\xi_k^* + \xi_k)$ w zależności (3.3) łącznie z ograniczeniami (3.4) odpowiada

za minimalizację globalnej funkcji błędu dla wszystkich wzorców uczących:

$$L_\varepsilon^N = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N L_\varepsilon(y_k, y(\mathbf{x}_k)) \quad (3.5)$$

Wartości ξ_k^*, ξ_k są odchyłkami odwzorowania każdego wzorca poza zakładaną tolerancję błędu ε . W procesie uczenia dąży się do ich minimalizacji przy spełnieniu wszystkich ograniczeń funkcyjnych (3.4). Z kolei człon $\frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w}$ odpowiada za poszerzenie tzw. marginesu separacji [47]. W podejściu regresyjnym, realizowanym w przestrzeni cech systemu, minimalizacja tego członu prowadzi do optymalnego ustalenia hiperpłaszczyzny aproksymatora w obrębie założonego pasma tolerancji błędu ε .

W sumie obydwa człony zależności (3.3) mają przeciwstawny charakter, a kompromis ustala się wprowadzając stałą regularyzacyjną C. Im większa jej wartość, tym dopasowanie systemu rośnie, natomiast spadają właściwości generalizacyjne i na odwrót.

Aby rozwiązać tak zdefiniowany problem minimalizacji, konstruuje się funkcje Lagrange'a (np.[56]). Tym samym otrzymuje się zapis zależności (3.6) rozszerzony o zbiór wszystkich ograniczeń (3.4) sterowanych mnożnikami Lagrange'a:

$$L(\mathbf{w}, b, \xi_k, \xi_k^*, \alpha_k, \alpha_k^*, \mu_k, \mu_k^*) = J(\mathbf{w}, \xi_k^*, \xi_k) - \sum_{k=1}^N \alpha_k (w^T \varphi(x_k) + b - y_k + \varepsilon + \xi_k) + \\ - \sum_{k=1}^N \alpha_k^* (y_k - w^T \varphi(x_k) - b + \varepsilon + \xi_k^*) - \sum_{k=1}^N (\mu_k^* \xi_k^* + \mu_k \xi_k), k = 1 \dots N \quad (3.6)$$

Następnie, stosując twierdzenie Fermata i wykorzystując warunki Karusha-Kuhna-Tuckera [52], otrzymuje się sformułowanie dualne programowania kwadratowego, wyrażone w dziedzinie mnożników Lagrange'a w postaci [50]:

$$\max_{\alpha_k, \alpha_k^*} Q(\alpha_k, \alpha_k^*) = \sum_{k=1}^N y_k (\alpha_k - \alpha_k^*) - \varepsilon \sum_{k=1}^N (\alpha_k + \alpha_k^*) - \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N (\alpha_k - \alpha_k^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) K(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_j) \quad (3.7)$$

Przy nierównościowych ograniczeniach funkcyjnych:

$$\begin{cases} 0 \leq \alpha_k^* \leq C \\ 0 \leq \alpha_k \leq C \\ \sum_{k=1}^N (\alpha_k - \alpha_k^*) \geq 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

Powyższe sformułowanie podlega dalej maksymalizacji względem mnożników Lagrange'a.

Pojawiający się w zależności (3.7) czynnik $K(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_j)$ jest jądrem systemu, który zadawany jest w sposób jawny i jest wynikiem złożenia niejawnych funkcji $\varphi(\cdot)$ [Łęski 2008]:

$$K(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_j) = \varphi(\mathbf{x}_k) \varphi(\mathbf{x}_j) \quad (3.9)$$

Postać jądra dobierana jest arbitralnie spośród wszystkich funkcji spełniających założenia twierdzenia Mercera [52].

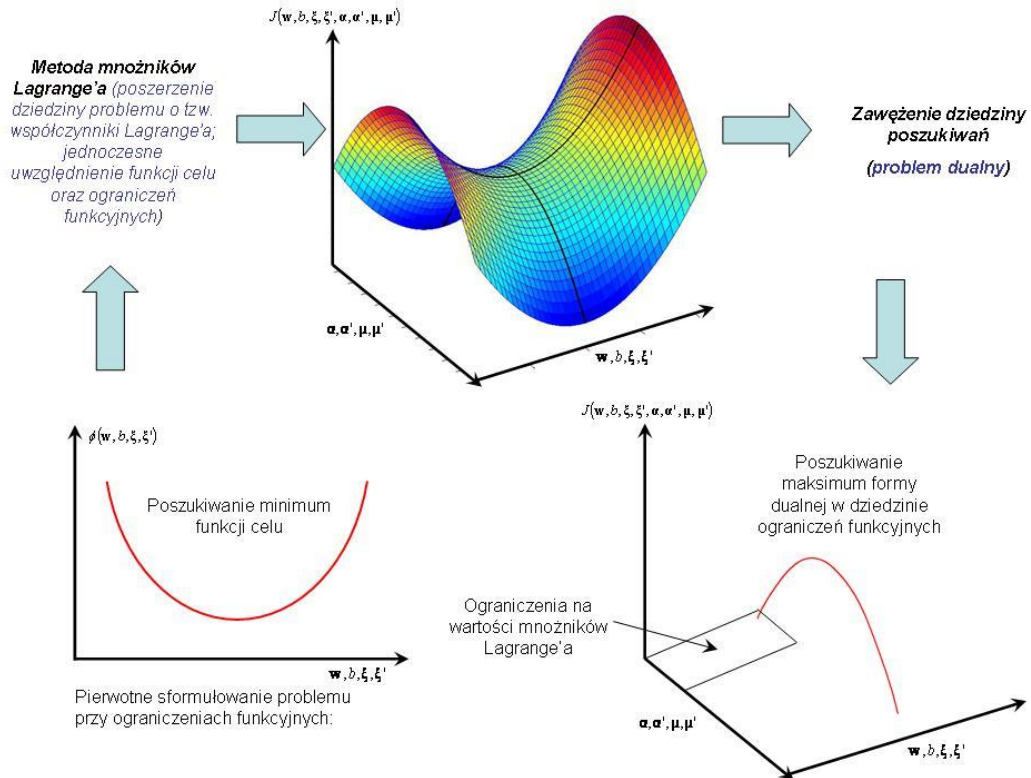
W wyniku tak przeprowadzanej procedury uczenia, po ustaleniu wartości mnożników Lagrange'a, wyznacza się wektor wag z zależności:

$$\mathbf{w} = \sum_{k=1}^{N_{SV}} (\alpha_k - \alpha_k^*) \varphi(\mathbf{x}_k) \quad (3.10)$$

Co z kolei pozwala na zapis ostatecznej postaci aproksymatora:

$$y(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^{N_{SV}} (\alpha_k - \alpha_k^*) K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) + b \quad (3.11)$$

Ogólny, uproszczony schemat procedury przedstawia rysunek 5.6.



Rys. 3.4. Konceptyjny schemat procedury uczenia metody ϵ -SVR

3.6.3. Ustalanie optymalnych wartości hiperparametrów (C , ϵ , σ) dla metody ϵ -SVR

Głównym problemem w podejściu ϵ -SVR jest ustalenie optymalnych wartości parametrów C , ϵ i σ .

Parametr σ jest wynikiem przyjęcia radialnych funkcji jąder dla budowanego aproksymatora i zgodnie z zależnością (3.12) określa jego szerokość [49].

$$K(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_j) = \exp\left(-\frac{(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_j)^2}{\gamma^2}\right)^{\sigma = \frac{1}{\gamma^2}} = \exp(-\sigma(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_j)^2) \quad (3.12)$$

Próbie wyznaczenia szukanych parametrów, dalej zwanych hiperparametrami podjęto w pracy [Rusek 2009], w której bazując na koncepcji „Meta-SVM” [53] wykorzystano dodatkowo miarę błędu FPE („Final Prediction Error”) [57]. W dalszym toku badań zdecydowano jednak o podjęciu, zdaniem autorów bardziej efektywnej, metody bazującej na koncepcji opisanej w [58]. Nadrzędnym etapem tej metody jest n-krotna walidacja skośna przeprowadzona na wstępnie przygotowanych zbiorach: treningowych i testujących. Dla każdej iteracji walidacji zakłada się pewien zakres rozpatrywanych parametrów C , ϵ i σ wyrażonych w skali logarytmicznej. Następnie, zgodnie z zaproponowanym algorytmem optymalizacyjnym „grid serach” (np. [54, 58]), prze-

prowadzana jest minimalizacja funkcji celu, przyjętej jako błąd MSE uśredniony ze wszystkich n zbiorów testowych wykorzystywanych w walidacji. W konsekwencji uzyskuje się optymalny, względem przyjętej strategii, zestaw szukanych hiperparametrów C , ϵ i σ . Algorytm *grid search* jest bezgradientową metodą minimalizacji globalnej [59]. Posiada on jednak pewną niedogodność, polegającą na konieczności podania zakresów dla przeszukiwanego obszaru oraz zadaniu punktu startowego. Dlatego w pracy zamiast algorytmu *grid search* zastosowano metodę optymalizacji bazującą na algorytmie genetycznym *GA* (*Genetic Algorithm*). Zastosowana metoda również jest algorytmem bezgradientowym, pozwalającym na wskazanie minimum globalnego. Opis działania algorytmów genetycznych w problemach minimalizacji funkcji wielu zmiennych można znaleźć np. w pozycjach [48, 59, 60].

3.6.4. Wyniki uzyskanych analiz dotyczących wyznaczania wartości wskaźnika izolacyjności R_w

W ramach podjętych badań utworzono bazę danych o empirycznych wartościach wskaźnika izolacyjności akustycznej R_w dla przegród dachowych o zbliżonym układzie warstwa, jak te wytypowane jako prototypowe w ramach rozdziału 3.4.

Badania przeprowadzono wykorzystując metodykę sieci neuronowych oraz metodę SVM w ujęciu regresyjnym.

Finalnie utworzono 150 modeli sieci neuronowych, spośród których wybrano ten, dla którego otrzymano najlepsze wyniki dopasowania dla zbioru treningowego, walidacyjnego i testowego. Model ten jest siecią typu MLP (Multilayer Perceptron) gdzie liczba neuronów ukrytych wynosi 22 (jest to sieć nr **128** występująca w zestawieniu wyników dla tego etapu w ramach **załącznika 2**). Aproksymowane wartości wskaźnika R_w przedstawiono w tabeli 3.8. Parametry opisujące strukturę utworzonego modelu sieci oraz charakterystyki świadczące o wysokim poziomie dopasowania i generalizacji zestawiono w **załączniku 2** niniejszego opracowania)

Tabela 3.8.

Wartości wskaźników izolacyjności akustycznej dla wytypowanych przegród uzyskane w wyniku symulacji utworzonego modelu sieci neuronowej typu MLP

Typ analizowanej przegrody	Wskaźnik izolacyjności akustycznej R_w
Paroc ROS 30 (50mm) + ROS 60 (160 mm)	42,49 dB
Paroc ROS 30 (50mm) + ROS 60 (200 mm)	43,16 dB

Z kolei w wyniku analiz z wykorzystaniem regresyjnego podejścia SVM na drodze optymalizacji opisanej w ramach rozdziału 3.6.3 uzyskano strukturę modelu, którego charakterystyki opisujące jakość oraz strukturę przedstawiono w tabelach Z.2.3 i Z.2.4 w **załączniku 2**. Finalnie w tej części analiz uzyskano parametry opisujące izolacyjne prototypowych przegród, które zestawiono w tabeli 3.9.

Tabela 3.9.

Wartości wskaźników izolacyjności akustycznej dla wytypowanych przegród uzyskane w wyniku symulacji utworzonego modelu SVM

Typ analizowanej przegrody	Wskaźnik izolacyjności akustycznej R_w
Paroc ROS 30 (50mm) + ROS 60 (160 mm)	40,71 dB
Paroc ROS 30 (50mm) + ROS 60 (200 mm)	42,63 dB

Uzyskane wyniki są bardziej zbliżone do danych eksperymentalnych wynikających z pomiarów laboratoryjnych. Wynika to stąd, że modele zostały utworzone na bazie danych informacji o rzeczywistych wartościach parametrów opisujących izolacyjność przegród zbliżonych do badanych prototypów.

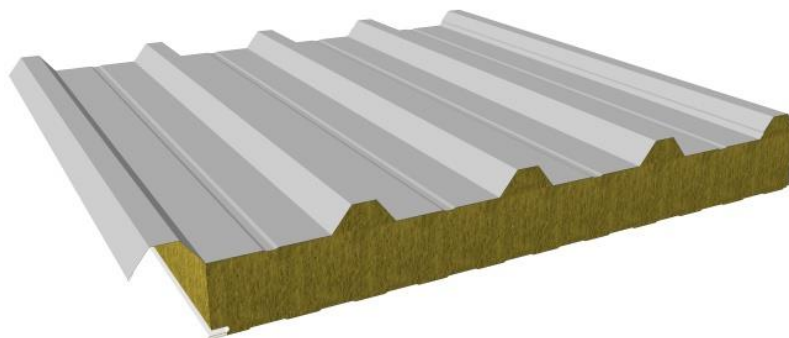
Niemniej jednak, dokładna ocena przydatności analizowanych rozwiązań stropodachu jest uzależniona od przeznaczenia obiektu budowlanego [36] oraz ekspozycji na ściśle określony poziom natężenia dźwięku A [44].

4. ANALIZA PORÓWNAWCZA WSPÓŁCZESNYCH ROZWIĄZAŃ LEKKICH STROPODACHÓW WARSTWOWYCH

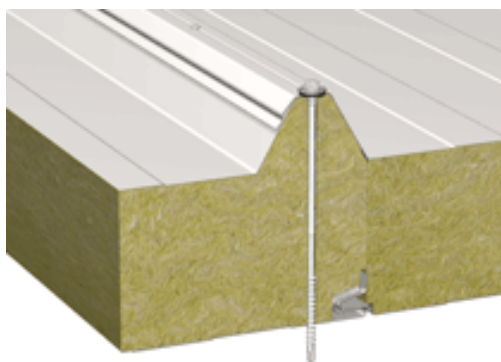
Przedmiotem opracowania są lekkie, warstwowe stropodachy pełne (por. rys. 1.1). Głównymi elementami wchodzącymi w skład poszczególnych rozwiązań tego typu stropodachów są: warstwa konstrukcyjna (przekrycie), paroizolacja, warstwa termoizolacyjna i pokrycie dachowe.

Z reguły montaż tego typu konstrukcji odbywa się na budowie i wymaga dostarczenia wszystkich elementów składowych. Wyjątek stanowią prefabrykowane płyty dachowe produkowane np. przez firmy: ABO - Fabryka Płyt Warstwowych (rys. 4.1), Balex Metal (rys. 4.2), Blachy Pruszyński (rys. 4.3) lub BALTIC Budownictwo. Wypełnienie takich elementów stanowi rdzeń z materiału termoizolacyjnego (wełna mineralna, styropian lub pianka poliuretanowa PUR). Mogą one stanowić obudowę (stropodachy i ściany) hal o lekkiej konstrukcji stalowej. Cechują się dobrymi własnościami termoizo-

lacyjnymi, odpowiednią sztywnością i relatywnie małym ciężarem własnym co umożliwia łatwy montaż oraz nie prowadzi do nadmiernego wyężenia elementów nośnych budynku.



Rys. 4.1. Prefabrykowana płyta dachowa z rdzeniem z wełny mineralnej typu EURO-therm D-Wm firmy ABO [28]



Rys. 4.2. Prefabrykowana płyta dachowa z rdzeniem z wełny mineralnej typu BALEXTHERM-MW-R firmy Balex Metal [29]



Rys. 4.3. Prefabrykowana płyta dachowa z rdzeniem z wełny mineralnej typu PWD-W 150 firmy Blachy Pruszyński [30]

Na potrzeby niniejszego opracowania skupiono się na rozwiązaniach, w których warstwę nośną (przekrycie) stanowi blacha trapezowa, a całość jest montowana na placu budowy. Pozwoliło to na porównanie stropodachów proponowanych przez firmę „Dach i Strych”, w większości opartych na tej technologii, z konkurencyjnymi produktami o podobnych specyfikacjach oferowanymi przez innych producentów.

Omawiane typy stropodachów składają się z wielu komponentów o zróżnicowanych własnościach fizycznych oraz przeznaczeniu (np. blacha trapezowa, pakiety wełny mineralnej, maty strukturalne itp.). Dlatego większość jednostek oferujących w swojej ofercie tego typu konstrukcje kooperuje z firmami produkującymi poszczególne elementy składowe stanowiące poszczególne warstwy stropodachu.

Firma „Dach i Strych” jest jedną z niewielu, która produkuje zarówno niektóre elementy składowe stropodachów, jak również lekkich ścian osłonowych. W przypadku stropodachów są to zaczepy kątowe typu ZK (por. rozdział 2). Oprócz firmy „Dach i Strych” producentem, w którego ofercie znajdują się stropodachy omawianego typu, oraz który wytwarza ich elementy składowe jest firma „Blachy Pruszyński”.

Z uwagi na specyfikę lekkiego stropodachu warstwowego, istotnym jego elementem jest zastosowana izolacja termiczna. W przypadku rozwiązań z izolacją z wełny mineralnej najszersze zastosowania mają produkty następujących firm: Rockwool, Isover, Ursa, Isoroc, Petralana.

W niniejszym rozdziale porównano 3 zbliżone jakościowo konstrukcje stropodachów różnych producentów. Przyjęto, że warstwa termoizolacyjna wykonana będzie z wełny mineralnej o łącznej grubości 250 mm i współczynnika przewodności cieplnej $\lambda = 0,037 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [14] oraz, że warstwą konstrukcyjną stropodachu będzie blacha trapezowa TR 94/250 grubości od 0,88 mm do 1,0 mm. Założenia te wynikają z wcześniej przeprowadzonych analiz dotyczących ustalania optymalnej grubości warstwy termoizolacyjnej (por. rozdział 3).

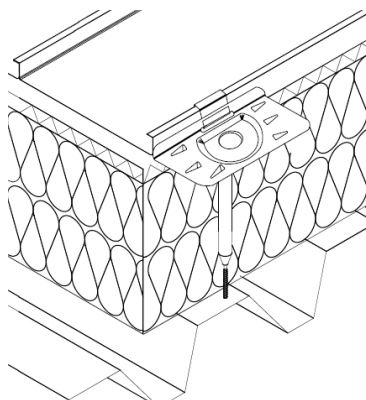
Na podstawie dostępnych materiałów źródłowych oraz ofert producentów wybrano rozwiązania różniące się technologią wykonania pokrycia dachowego.

Ostatecznie wyróżniono trzy reprezentatywne rozwiązania. Pierwszym z nich jest rozwiązanie pokrycia dachowego w technologii *DiS System* firmy „Dach i Strych”. Polega ono na układaniu blachy (w analizowanym przypadku blachy tytanowo-aluminiowej grubości 0,7 mm w kolorze RAL 9006) i łączeniu jej na rąbek stojący z zastosowaniem zaczepów typu ZK (por. rys. 4.4 i 4.5)

Drugim wyróżnionym rozwiązaniem jest system wykonywania pokryć dachowych z analogicznych materiałów, jak w przypadku pokrycia firmy „Dach i Strych” (czyli blachy tytanowo-aluminiowej w kolorze standardowym RAL 9006) oferowany przez firmę „Dachy Pruszyński” pod nazwą *Tytanium Pruszyński*. Różnicą jest tutaj mocowa-

nie arkuszy blachy pokrycia dachowego za pomocą zaczepów mocujących do ceowników sześciogiętych (rys. 4.6) [15] blacha z przetłoczeniem tzw. Clip Relief (rys. 4.7) [16].

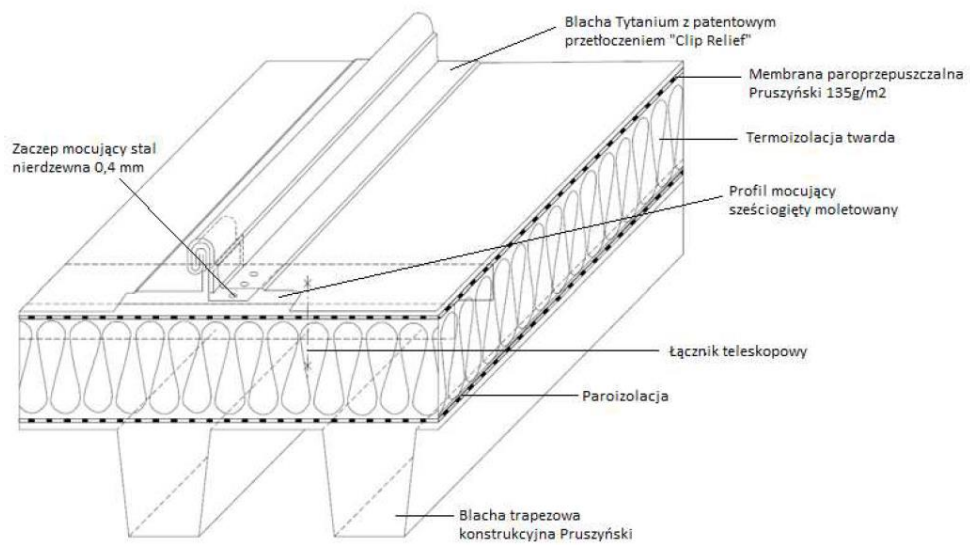
Trzecim wytypowanym rozwiązaniem został stropodach z pokryciem wykonanym w technologii *Kalzip* [17, 43]. Uwzględniono taki sam materiał pokrycia dachowego, jak w przypadku pozostałych rozwiązań. Różnicą jest sposób mocowania arkuszy blachy pokrycia dachowego, w którym wykorzystuje się tzw. klipy mocujące (por. rys. 4.8 i 4.9). Klipy te mogą być wykonane zarówno z tworzyw sztucznych, jak i metalu. Technologia *Kalzip* wymaga zastosowania warstwy termoizolacyjnej z wełny mineralnej miękkiej.



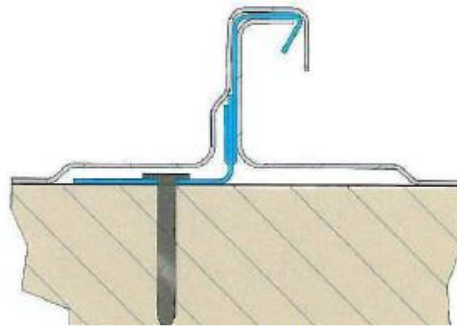
Rys. 4.4. Łączenie pokrycia dachowego w systemie „DiS System” firmy „Dach i Strych” [8]



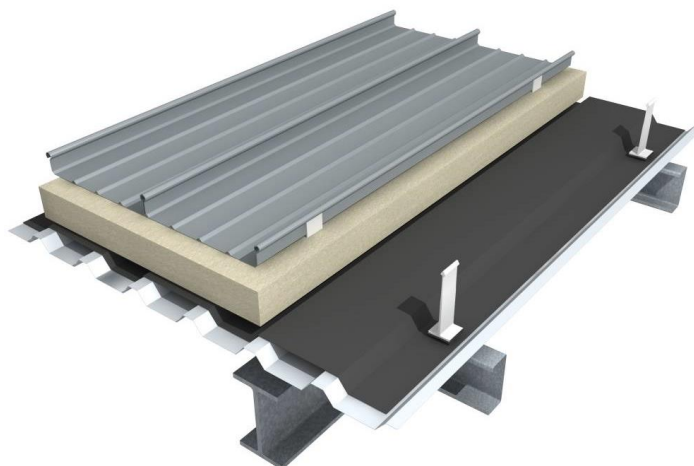
Rys. 4.5. Przykład wykonanego pokrycia dachowego w systemie „DiS System” firmy „Dach i Strych” [10]



Rys. 4.6. Stropodach w systemie „Titanium Pruszyński” firmy „Dachy Pruszyński” [15]



Rys. 4.7. Clip Relief firmy „Dachy Pruszyński” [16]



Rys. 4.8. Schemat stropodachu wykonanego w systemie „Kalzip” [31]



Rys. 4.9. Łącznik wykorzystywany w systemie „Kalzip” [17]

Dane technologiczne i materiałowe wszystkich analizowanych rozwiązań stropodachów zestawiono w tabeli 4.1. W zestawieniu tym przedstawiono również koszty wykonania 1 m² powierzchni stropodachu z uwzględnieniem dopełniających obróbek blacharskich. Z przeprowadzonej analizy wynika, że prototyp systemowego stropodachu *DiS System* firmy „Dach i Strych” jest najkorzystniejszy cenowo w porównaniu do produktów konkurencyjnych.

Dodatkowo dokonano oceny analizowanych rozwiązań w aspekcie materiałowym, wykonawczym oraz z uwzględnieniem ich trwałości. Wyniki tej oceny zestawiono poniżej.

A. W systemie *Kalzip* stwierdzono występowanie mostków termicznych, co wynika wprost ze specyfiki rozwiązania, w ramach którego stosowane są aluminiowe klipy. Sytuacji nie poprawia stosowanie dodatkowych podkładek. Ponadto w systemie *Kalzip* stosowana jest termoizolacja z miękkiej wełny mineralnej, co prowadzi do pogorszenia własności akustycznych. Systemy *DiS System* oraz *Tytanium Pruszyński* nie posiadają wyżej wymienionych wad.

Tabela 4.1.

Charakterystyka techniczna analizowanych stropodachów oraz koszty budowy przypadające na 1 m²

Nazwa systemu	Warstwy stropodachu	Cena za 1 m ²
<i>DiS System</i>	Błacha trapezowa TR 94/250 grubości 1,0 mm	340,00
	paroizolacja z papy samoprzylepnej z wkładką aluminiową $S_d > 1500$	
	izolacja z wełny mineralnej twardej gr. 25 cm	
	membrana paroprzepuszczalna 180 g/m ²	
	pokrycie z blachy tytanowo-aluminiowej gr. 0,7 mm w kolorze standardowym RAL 9006	
<i>Tytanium Pruszyński</i>	Błacha trapezowa TR 94/250 grubości 1,0 mm	353,00
	paroizolacja z papy samoprzylepnej z wkładką aluminiową $S_d > 1500$	
	izolacja z wełny mineralnej twardej gr. 25 cm	
	membrana paroprzepuszczalna 135 g/m ²	
	pokrycie z blachy tytanowo-aluminiowej gr. 0,7 mm w kolorze standardowym RAL 9006	
<i>Kalzip</i>	Błacha trapezowa TR 94/250 grubości 1,0 mm	430,00
	paroizolacja z papy samoprzylepnej z wkładką aluminiową $S_d > 1500$	
	izolacja z wełny mineralnej miękkiej gr. 25 cm	
	membrana paroprzepuszczalna 135 g/m ²	
	pokrycie z blachy tytanowo-aluminiowej gr. 0,7 mm w kolorze standardowym RAL 9006	

B. W systemach DiS System oraz Tytanium Pruszyński mocowania blach pokrycia dachowego uniemożliwiają ruchy blachy na styku z termoizolacją. Ruchy spowodowane rozszerzalnością termiczną są zapewnione przez łączniki (w systemie DiS System są to zaczepy typu ZK). W przypadku technologii stosowanej w systemie Kalzip występują luźne połączenia co skutkuje przesuwaniem się blachy po termoizolacji, a to może prowadzić do jej uszkodzenia.

C. Kalzip jest systemem, w którym blachy pokrycia są połączone na stosunkowo mały, mechanicznie zamknięty zakład. Z tego względu istnieje ryzyko nieszczelności stropodachu, szczególnie w przypadku dachów płaskich w okresach opadów śniegu, gdy woda opadowa z roztopów może migrować do wnętrza przegrody przez szczeliny wokół klipów pokrycia.

D. Stosowanie miękkiej wełny mineralnej w systemie Kalzip utrudnia przeprowadzanie czynności związanych z utrzymaniem dachu. W przypadku konieczności wejścia na

połączyć należy wznieść tymczasowe pomosty, ponieważ blacha pokrycia ułożona na miękkiej wełnie mineralnej nie jest przystosowana do przenoszenia obciążeń skupionych.

- E. Wykonanie obróbek w systemie Kalzip wymaga techniki spawania. Wynika to z faktu, iż połączenie blach jest sztywne i nie podatne na obróbkę blacharską. Uszczelnienie koszy i koryt zlewiskowych jest bardzo trudne co może skutkować przeciekami. Wykonanie kalenicy, otworów oraz obróbek świetlików, klap dymowych, wyłazów jest bardzo skomplikowane. W systemach DiS System oraz Tytanium Pruszyński można wykonać szczelne połączenie obróbek wykorzystując technikę „felcowania” zarówno przy okapie, kalenicy jak i realizacji przebić przez dach, wyłazów dachowych, itp.
- F. Systemy DiS System i Tytanium Pruszyński, cechują się podobnymi właściwościami, które gwarantują szczelność, dobre parametry termiczne i łatwość utrzymania wzniesionych konstrukcji. Jednak w systemie DiS System czas montażu pokrycia dachowego z wykorzystaniem prefabrykowanych zaczepek typu ZK jest zdecydowanie krótszy, niż w przypadku systemu Tytanium Pruszyński. Ponadto zastosowanie w miejscach połączeń ceowników sześciogiętych w systemie Tytanium Pruszyński wymaga zamocowania tych elementów w termoizolacji, co może pogorszyć właściwości termiczne przegrody. Dodatkowo, stosowanie tego typu łączników może przyczyniać się do deformacji i wygięć blachy pokrycia, co z kolei może skutkować stagnacją wody opadowej na powierzchni dachu (por. rys. 4.10).



Rys. 4.10. Zaginanie blachy pokrycia wzdłuż krawędzi łączników w systemie Tytanium Pruszyński [11]

5. PROPOZYCJA ULEPSZONEGO ROZWIĄZANIA STROPODACHU WARSTWOWEGO

5.1. Wskazanie modyfikacji materiału termoizolacyjnego

Optymalne rozwiązanie pokrycia dachowego, którego układ warstw został ustalony na drodze analiz przedstawionych w rozdziale 3, bazuje na wykorzystaniu materiałów termoizolacyjnych najczęściej stosowanych przez firmę „Dach i Strych” w ramach prowadzonych przez nią inwestycji budowlanych. Dlatego zdecydowano o przeprowadzeniu badań, mających na celu weryfikację stosowalności innego rodzaju warstwy termoizolacyjnej. Na podstawie rozeznania własności termicznych innych materiałów termoizolacyjnych niż wełna mineralna oraz po wstępnie przeprowadzonych obliczeniach [obliczenia dostępne są w archiwum autorów] zdecydowano o zastosowaniu pianki poliuretanowej (PUR [32]).

5.2. Optymalizacja grubości warstwy termoizolacyjnej PUR - obliczenia

Na bazie wytycznych uzyskanych od firm „Dach i Strych” dotyczących grubości stosowanych blach trapezowych oraz uwzględniając graniczne wartości współczynnika przenikania ciepła zgodnie z [5], ustalono minimalną grubość warstwy termoizolacyjnej z pianki PUR dla dwóch okresów czasowych (do 2020 roku oraz od 2021 roku). Otrzymane rezultaty przedstawiono w tabeli 5.1 i 5.2.

W obliczeniach uwzględniono gradację liczby łączników przypadających na 1 m² powierzchni dachu (od 4 do 13 szt.) oraz grubość blachy trapezowej (od 0,5 mm do 1,5 mm). Jako wartość kryterialną do procedury optymalizacji grubości warstwy termoizolacyjnej (g_T) przyjęto uwikłaną funkcję współczynnika przenikania ciepła opisaną zgodnie z zależnością (2). W obliczeniach zastosowano współczynnik przewodzenia ciepła dla pianki poliuretanowej PUR równy $\lambda = 0,020$ W/mK [32].

Uzyskane wyniki obrazują zmienność potrzebnej (minimalnej) grubości warstwy termoizolacyjnej PUR względem liczby zastosowanych łączników. Stwierdzono, że grubość blachy trapezowej przekrycia nie ma wpływu na wartości uzyskanych wyników.

$$U_{\max} = 0.5 \cdot \left(\left(\frac{1}{R_{se} + R_{si} + R_w + \frac{g_T}{\lambda_T}} \right) + \left(\frac{1}{R_{se} + R_{si} + R_w + R_p + \frac{g_T}{\lambda_T}} \right) \right) + \frac{\alpha_{f2} A_{f2} n_f g_T}{\left(g_T + \lambda_T (R_{se} + R_{si} + R_w + 0.5R_p) \right)^2} \quad (2)$$

gdzie:

R_{se} , R_{si} – opory przejmowania ciepła po zewnętrznej i wewnętrznej stronie przegrody,

R_w – opór warstw przegrody (bez termoizolacji i pustki powietrznej),

R_p – opór nieruchomej warstwy powietrza,

g_T – grubość termoizolacji,

A_{f2} – przekrój poprzeczny wkrętu mocującego,

n_f – liczba łączników zaopatrzonych w wkręty mocujące,

α_{f2} – współczynnik normowy,

λ_T – współczynnik przewodzenia ciepła dla materiału z którego wykonany jest wkręt mocujący.

Tabela 5.1.

Optymalne grubości warstwy termoizolacyjnej z pianki PUR dla $U_{max} = 0,18 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ – wymaganego do roku 2020

	Liczba łączników [szt./m ²]									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Minimalna grubość termoizolacji z pianki PUR	10,71	10,72	10,73	10,74	10,74	10,75	10,76	10,77	10,78	10,78

Tabela 5.2.

Optymalne grubości warstwy termoizolacyjnej z pianki PUR dla $U_{max} = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ – wymaganego od roku 2021

	Liczba łączników [szt./m ²]									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Minimalna grubość termoizolacji z pianki PUR	12,94	12,95	12,96	12,97	12,98	12,99	13,00	13,01	13,02	13,03

Uzyskane wyniki wskazują, że rozmieszczenie łączników ma wpływ na graniczną wartość termoizolacji. Jest on jednak niewielki, co pozwala stwierdzić, że optymalną grubość termoizolacji wykonanej z pianki poliuretanowej PUR można przyjąć równą 11 cm (dla warunków technicznych obowiązujących do 2020 roku) oraz 13 cm (dla okresu od 2021 roku). Można zatem odnieść się do badań wykonywanych dla materiałów termoizolacyjnych stosowanych do tej pory przez firmę „Dach i Strych” i stwierdzić, że zastosowanie pianki PUR pozwala zmniejszyć grubość potrzebnej termoizolacji z 21 cm do 11 cm (dla warunków technicznych obowiązujących do 2020 roku) oraz z 25 cm do 13 cm (od 2021 roku).

Wyodrębnione rozwiązanie przeanalizowano w aspekcie izolacyjności akustycznej. I tak, dla każdego z dwóch analizowanych rozwiązań, wyłonionych wcześniej na etapie kalibracji współczynnika przenikania ciepła U , wyznaczono wskaźnik izolacyjności akustycznej R_w . W tym celu, zgodnie z [45] oraz danymi na temat cech akustycznych materiałów wchodzących w skład analizowanych przegród wyznaczono analitycznie wskaźnik izolacyjności akustycznej zgodnie z zależnością (1).

$$R_w = -10 \lg \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{100} 10^{-0,1R_i} \quad (1)$$

- R_w – wypadkowa izolacyjność akustyczna właściwa przegrody w poszczególnych pasmach częstotliwości lub dla określonego wskaźnika oceny [dB],
- R_i – izolacyjność akustyczna właściwa poszczególnej warstwy przegrody w poszczególnych pasmach częstotliwości lub dla określonego wskaźnika oceny [dB],
- p_i – procentowy udział powierzchni poszczególnych warstw przegrody o izolacyjności R_i w całkowitej powierzchni przegrody [%],
- n – liczba warstw przegrody o różnej izolacyjności akustycznej R_i .

W tabeli 5.3 przedstawiono wyniki wartości obliczonego wskaźnika izolacyjności akustycznej R_w .

Tabela 5.3.

Wartości wskaźnika izolacyjności akustycznej R_w dla wytypowanych stropodachów

Wytypowane stropodachy z warstwą termoizolacyjną z pianki PUR	Wskaźnik izolacyjności akustycznej R_w [dB]
warstwa pianki PUR o gr. 11 cm	30
warstwa pianki PUR o gr. 13 cm	31

Wyznaczone wartości wskaźnika izolacyjności R_w pozwalają na wyznaczenie wskaźników R_{A1} i R_{A2} .

Uzyskane wartości wskaźnika R_w są wyraźnie niższe od tych uzyskanych dla przegrody z warstwami termoizolacyjnymi z płyt z wełny mineralnej, jednakże nie są niższe niż minimalne określone w [36]. Należy podkreślić, że dokładna ocena przydatności analizowanych rozwiązań stropodachu jest uzależniona od przeznaczenia obiektu budowlanego oraz poziomu dźwięku A. Dlatego ocenę tę można przeprowadzić dopiero w przypadku projektowania inwestycji o ściśle określonym przeznaczeniu i w określonym otoczeniu determinującym natężenie dźwięku.

5.3. Porównanie kosztów dla stropodachu z warstwą termoizolacyjną z wełny mineralnej oraz zaproponowaną modyfikacją

W celu porównania kosztów zestawiono dwa rozwiązania stropodachów. W jednym rozwiązaniu zastosowano, jako warstwę termoizolacyjną zastosowano wełnę mineralną grubości 25 cm przy współczynniku przenikania ciepła $\lambda = 0,038$ W/mK. W drugim warstwę wełny zastąpiono pianką poliuretanową PUR grubości 13 cm o współczynniku przenikania ciepła $\lambda = 0,020$ W/mK. Grubości warstw zostały wyłonione jako optymalne na drodze obliczeń, których wyniki zamieszczono odpowiednio w rozdziale 3 (dla stropodachu z wełną mineralną) oraz podrozdziale 5.2 (dla ulepszonego rozwiązania z termoizolacją z pianki PUR). Odpowiadają one warunkom technicznym jakie będą obowiązywać od 2021 roku [5]. Dane do sporządzenia wyceny zostały udostępnione na rzecz niniejszego opracowania przez firmę „Dach i Strych”.

Aby ujednorodnić porównanie cenowe przyjęto, że poszczególnymi warstwami w obu przypadkach są licząc od warstwy podłoża:

- blacha trapezowa TR 94/250/1 gr. 1,0 mm,
- paroizolacja z papy samoprzylepnej z wkładką aluminiową $S_d > 1500$,
- izolacja termiczna:

wariant 1: wełna mineralna gr. 25 cm

wariant 2: pianka poliuretanowa PUR gr. 13 cm,

- membrana paroprzepuszczalna 180 g/m²,
- pokrycie z blachy tytanowo-cynkowej gr. 0,7 mm w kolorze standardowym RAL 9006,
- mocowanie pokrycia za pośrednictwem zaczepów typu ZK,
- orynnowanie,
- towarzyszące obróbki.

W tabeli 5.4 zestawiono ceny za 1 m² dla analizowanych rozwiązań oraz procentową różnicę względem rozwiązania standardowego, w którym warstwę termoizolacyjną stanowi wełna mineralna.

Tabela 5.4.

Porównanie kosztów stropodachów o różnych warstwach termoizolacyjnych

Cena budowy 1 m ² stropodachu [zł/m ²]		Procentowe obniżenie kosztu budowy stropodachu
wariant 1 (bazowy) - termoizolacja z wełny mineralnej o gr. 25 cm	wariant 2 (zmodyfikowany) - termoizolacja z pianki PUR o gr. 13 cm	16 %
340	295	

6. ANALIZA NUMERYCZNA PROPONOWANEGO PRZEKRYCIA DACHOWEGO

Analizę numeryczną MES przeprowadzono w dwóch wariantach. W każdym z nich zbudowano trójwymiarowy model przegrody o wymiarach w rzucie 1,0 x 1,0 m. Grubość całkowita modelu była zróżnicowana i zależała od zastosowanej warstwy izolacji termicznej. W pierwszym wariantcie zastosowano warstwę termoizolacji w postaci wełny mineralnej o grubości 25 cm. W drugim wariantcie warstwę termoizolacji była płyta z pianki poliuretanowej PUR grubości 13 cm. Uwzględniając dodatkowo warstwę blachy trapezowej oraz wierzchnią warstwę blachy do felcowania uzyskano całkowitą grubość modelu równą 0,2514 dla wariantu pierwszego oraz 0,1314 dla wariantu drugiego. W obu wariantach zamodelowano również wkręty o średnicy 4,8 mm, przechodzące przez całą grubość termoizolacji. Rozmieszono je w trzech pasmach, po 3 wkręty w każdym z nich.

Na rys. 6.1 przedstawiono utworzone modele numeryczne analizowanych wariantów przegrody. W tabeli 6.1 zestawiono parametry fizyczne, które przyjęto do analiz.

Tabela 6.1.

Parametry fizyczne materiałów przyjęte do obliczeń numerycznych MES [7, 34, 35]

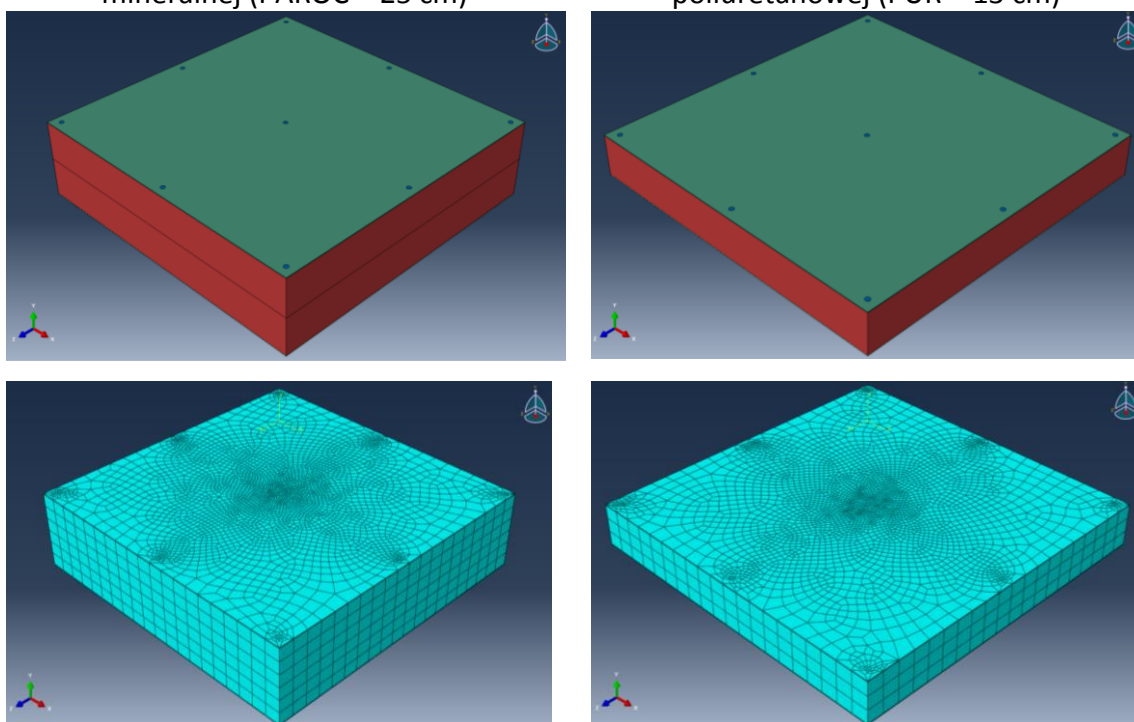
Elementy stropodachu	Grubość/ średnica	Współczynnik przewodzenia ciepła [W/mK]	Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Ciepło właściwe [J/kgK]
Blacha do felcowania	0,7 mm	200	2700	870
Blacha trapezowa T135	1,0 mm	58	7850	460
Wełna mineralna (PAROC)	250 mm	0,038	135	750
Płyta z pianki poliuretanowej PUR	130 mm	0,020	40	1460

W ramach analiz symulacyjnych MES rozwiązano problem stacjonarnego przepływu ciepła przez przegrodę warstwową [33]. Dla utworzonego modelu zastosowano 8-węzłowe, liniowe elementy skończone, dedykowane do numerycznej analizy przepływu ciepła. Zewnętrzne oddziaływania termiczne wprowadzono za pomocą warunków brzegowych dedykowanych pod analizę przepływu ciepła. Ich wartości przyjęto w zakresie 20°C (293,15 K) wewnątrz oraz -20°C (253,15 K) na zewnątrz przegrody.

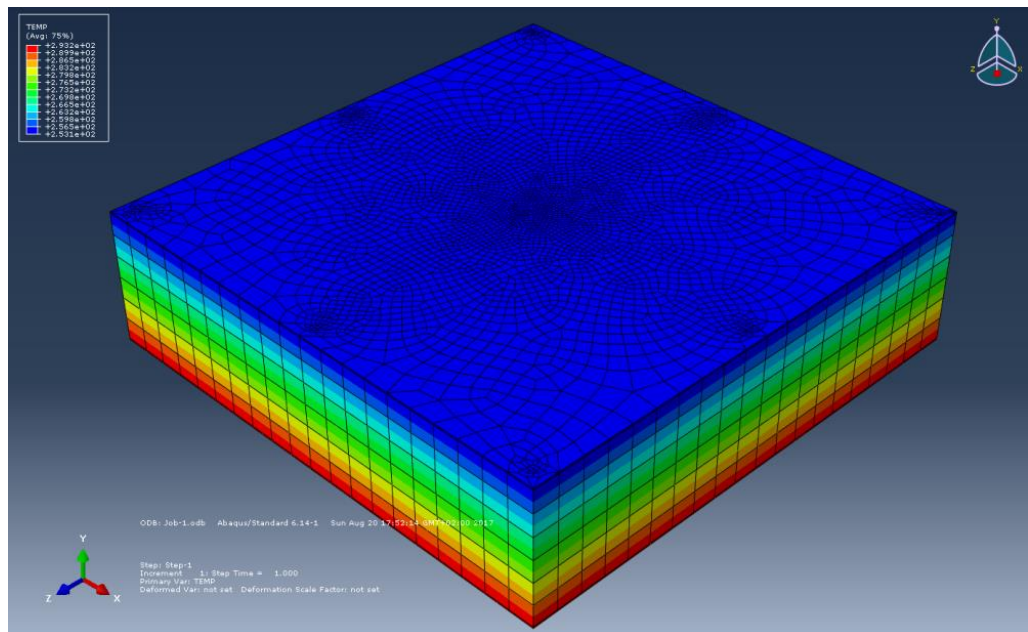
W wyniku obliczeń uzyskano rozkład temperatury w przegrodzie (T) oraz rozkład strumienia ciepła (q). Wyniki te, w postaci map przedstawiono na rys. 6.2 do 6.7.

Wariant 1. Warstwa termoizolacji z wełny mineralnej (PAROC – 25 cm)

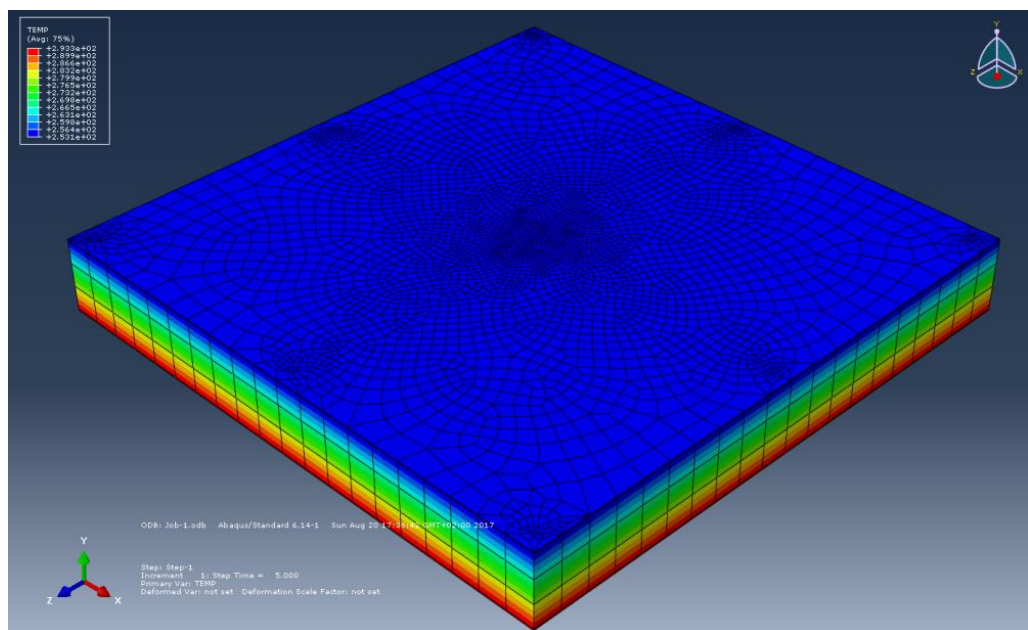
Wariant 2. Warstwa termoizolacji z pianki poliuretanowej (PUR – 13 cm)



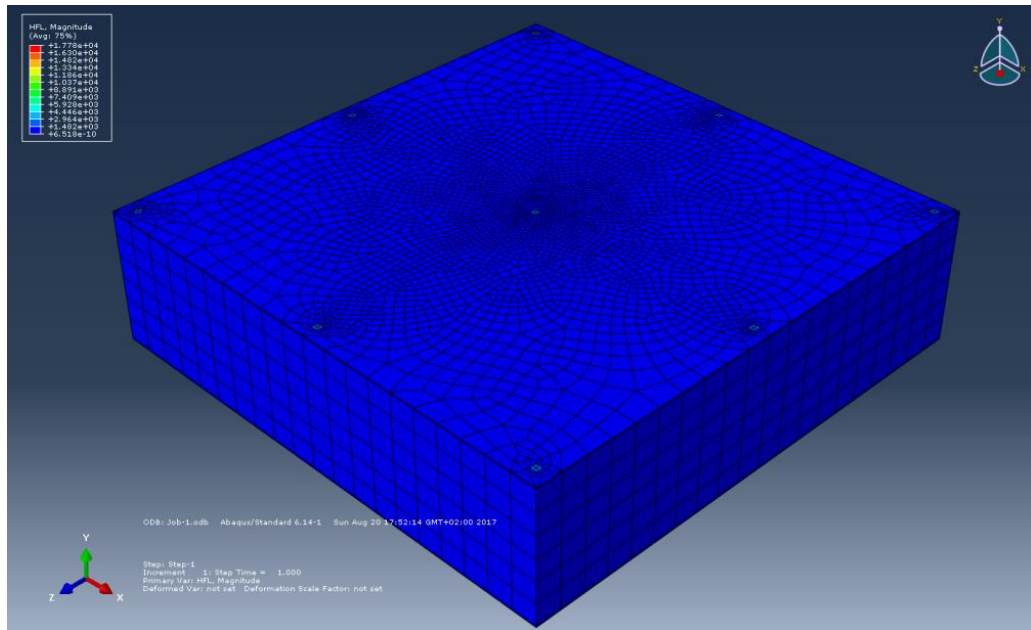
Rys. 6.1. Modele numeryczne analizowanych przegród



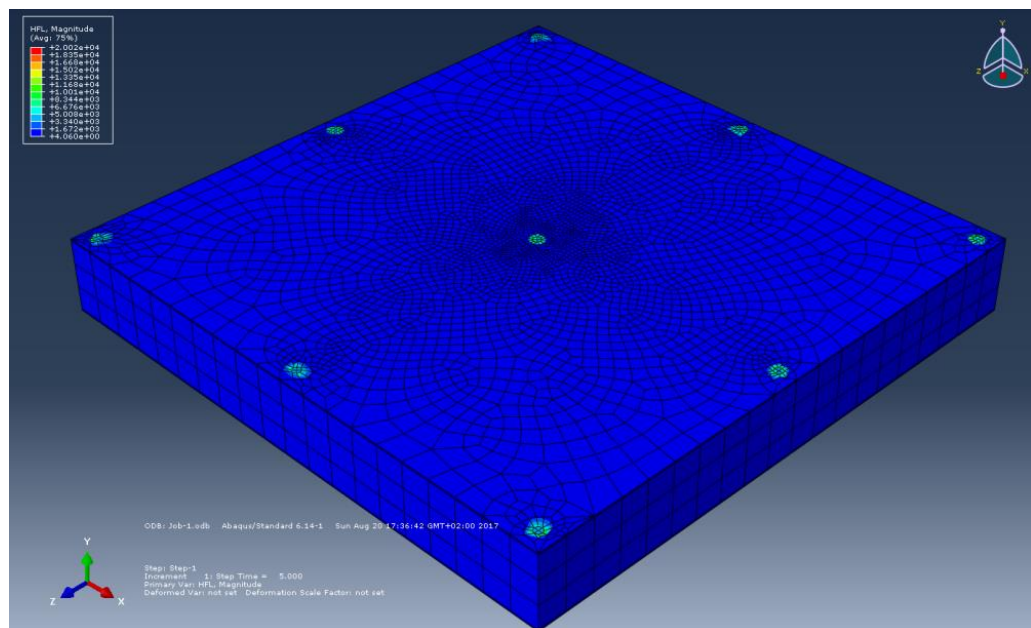
Rys. 6.2. Wariant 1. Warstwa termoizolacji z wełny mineralnej (PAROC – 25 cm).
Rozkład temperatury w przegrodzie



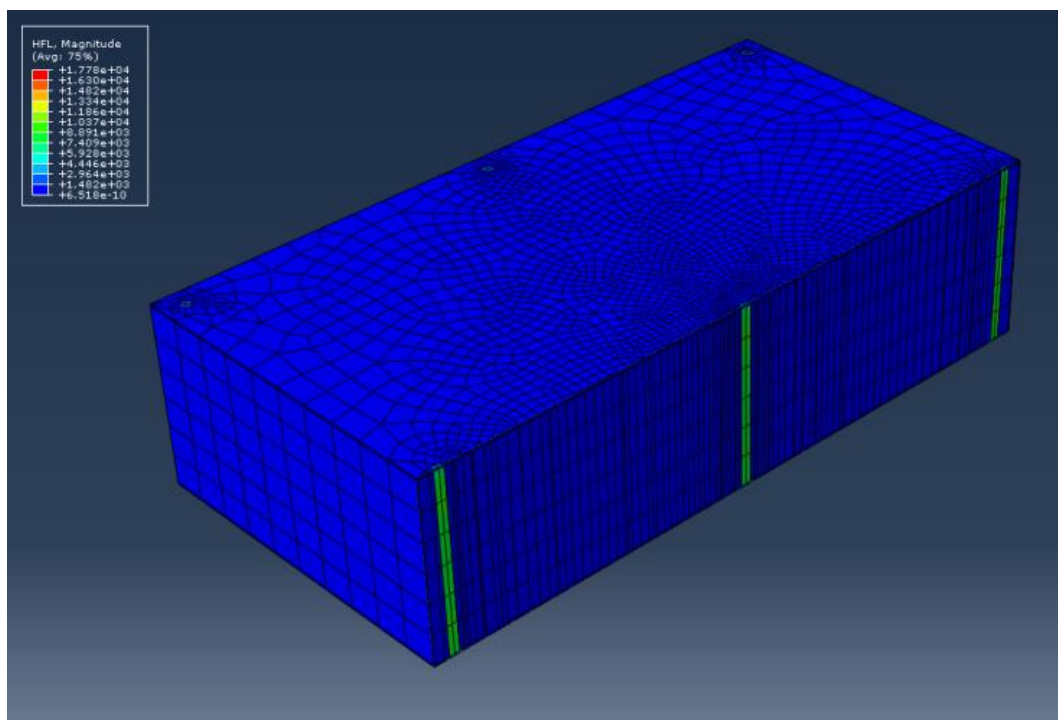
Rys. 6.3. Wariant 2. Warstwa termoizolacji z pianki poliuretanowej (PUR – 13 cm).
Rozkład temperatury w przegrodzie



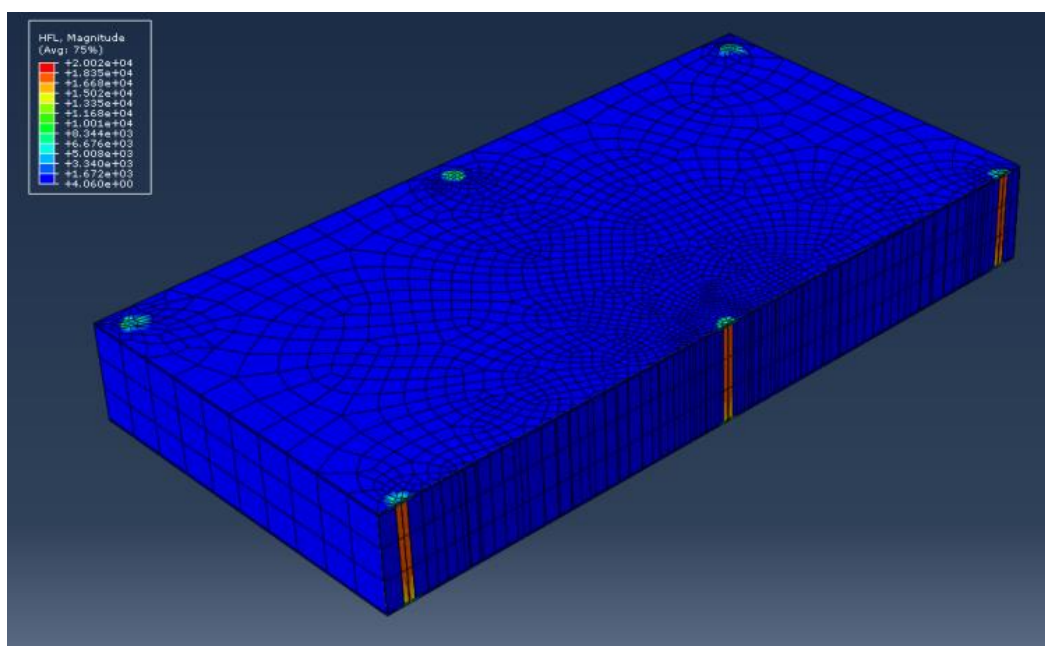
Rys. 6.4. Wariant 1. Warstwa termoizolacji z wełny mineralnej (PAROC – 25 cm).
Rozkład strumienia ciepła w przegrodzie



Rys. 6.5. Wariant 2. Warstwa termoizolacji z pianki poliuretanowej (PUR – 13 cm).
Rozkład strumienia ciepła w przegrodzie



Rys. 6.6. Wariant 1. Warstwa termoizolacji z wełny mineralnej (PAROC – 25 cm).
Rozkład strumienia ciepła w przegrodzie (przekrój przez wkręty)



Rys. 6.7. Wariant 2. Warstwa termoizolacji z pianki poliuretanowej (PUR – 13 cm).
Rozkład strumienia ciepła w przegrodzie (przekrój przez wkręty)

Analizując rozkład temperatur w przegrodzie z wełny mineralnej (rys. 6.2) oraz pianki poliuretanowej (rys. 6.3), można stwierdzić, że w przypadku stropodachu z wełny mineralnej, większa jest strefa temperatur dodatnich przy wewnętrznej stronie przegrody. Jednakże, proporcjonalnie większa jest też strefa temperatur ujemnych ($< 273,15$ K), co implikuje konieczność stosowania dodatkowej warstwy wiatroizolacji przy powierzchni zewnętrznej, aby uniemożliwić migrację wody do tej części przegrody i ochronić warstwę termoizolacji przed uszkodzeniami powodowanymi jej okresowym zamarzaniem. W przypadku termoizolacji z pianki poliuretanowej PUR, strefa przegrody znajdująca się w obszarze ujemnych temperatur, jest relatywnie mniejsza, co uwzględniając dodatkowo mniejszą (niż wełny mineralnej) nasiąkliwość pianki PUR zmniejsza ryzyko uszkodzeń wynikających z ewentualnej penetracji wody i jej zamarzania.

W przypadku analiz wartości strumienia ciepła q (W/m^2) stwierdzono, że w obu badanych przegrodach jest on równomierny, a jego wartość oscyluje w granicach $5 W/m^2$ – dla przegrody z wełną mineralną oraz $6 \div 6,5 W/m^2$ – dla przegrody z płytą z pianki termoizolacyjnej PUR (rys. 6.4 i 6.5). Jedyne zaburzenia widoczne są w strefie gdzie warstwy połączone są wkrętami stalowymi (rys. 6.6 i 6.7). Wzdłuż łączników przepływ strumienia ciepła jest zdecydowanie wyższy niż w pozostałej części przegrody, co spowodowane jest wysoką wartością współczynnika przewodzenia ciepła dla stali ($\lambda = 58 W/m^2K$). Zaburzenie związane z lokalną wyższą wartością strumienia ciepła w obszarze łączników, propagują nieznacznie na przystające elementy przegrody co widać szczególnie w wariacie gdzie zastosowana jest termoizolacja z pianki poliuretanowej PUR (rys. 7.7). Przegroda, w której zastosowano wełnę mineralną cechuje się mniejszą podatnością na tego typu zaburzenia. Niemniej jednak, nawet w przypadku przegrody z pianką PUR zasięg rozprzestrzeniania się tych zaburzeń jest niewielki i w ekstremalnych przypadkach dochodzi jedynie do 10 mm od obrysu łącznika.

7. OCENA ZAPLECZA TECHNOLOGICZNEGO FIRMY „DACH I STRYCH”

Zaplecze technologiczno-magazynowe firmy „Dach i Strych” zlokalizowane jest w budynku przy ul. Kamiennej 10 w Krakowie. W północno-zachodniej części budynku znajdują się pomieszczenia socjalno-biurowe zajmowane przez firmę „Dach i Strych”. Pozostała część budynku, stanowiąca zaplecze technologiczno-magazynowe, została

podzielona na trzy pomieszczenia, w których odbywa się produkcja elementów składowych stosowanych do budowy stropodachów oraz ścian osłonowych.

W ramach niniejszej analizy skupiono się na tej części zaplecza technologiczno-magazynowego, w której wytwarzane są opisane w rozdziale 2 zaczepy kątowe typu ZK-1, 2, 3 i 4. W pozostałych pomieszczeniach zaplecza odbywa się produkcja innych typów elementów blacharskich.

W skład istniejącej linii produkcyjnej wchodzi trzy prasy mimośrodowe. Pierwsza z nich, zlokalizowana w południowo-zachodniej części zaplecza jest urządzeniem starego typu, którego praca bazuje w całości na obsłudze manualnej dokonywanej przez wykwalifikowanego pracownika (rys. 7.1). Jest to urządzenie firmy HENSEL. Prasa mimośrodowa zlokalizowana w części północno-wschodniej, jest urządzeniem relatywnie nowszym typu J23-25 firmy *Haven*, lecz podobnie jak poprzednie urządzenie, nie jest zautomatyzowana i proces wytwarzania jest obsługiwany przez pracownika (rys. 7.2). Trzecia prasa mimośrodowa, zlokalizowana w północno-zachodniej części zaplecza jest urządzeniem najnowszym firmy *DIRINLER*, które cechuje częściowa automatyzacja procesu wytwarzania składowych elementów stanowiących bazę do budowy zaczepów kątowych (rys. 7.3).

Każda z zainstalowanych pras mimośrodowych wyposażona jest w rozwijak oraz bezpośredni podajnik materiału, który ma zostać poddany obróbce.



Rys. 7.1. Prasa mimośrodowa (manualna) firmy HENSEL oraz rozwijak stanowiące jedno stanowisko robocze w północno-zachodniej części zaplecza technologiczno-magazynowego firmy „Dach i Strych”



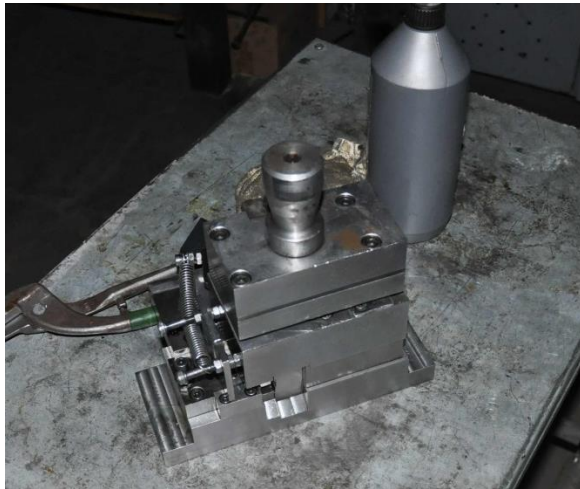
Rys. 7.2. Prasa mimośrodowa (manualna) oraz rozwijak stanowiące jedno stanowisko robocze w północno-wschodniej części zaplecza technologiczno-magazynowego firmy „Dach i Strych”



Rys. 7.3. Prasa mimośrodowa firmy DIRINLER oraz rozwijak, będące najnowocześniejszym stanowiskiem roboczym w części zaplecza technologiczno-magazynowego firmy „Dach i Strych”

Niestety w trakcie pracy pras mimośrodowych z obsługą manualną, dość często dochodzi do ich zablokowania na wskutek braku precyzyjnego podawania materiału przez pracownika (w efekcie skoku podajnika). Zablokowanie urządzenia powoduje zatarcie matrycy przeznaczonej do wytwarzania danego elementu. Wymagana jest w takich przypadkach manualna rozbiórka fragmentu prasy, wyciągnięcie matrycy oraz jej szlifowanie, co spowalnia proces produkcji oraz zmniejsza jego efektywność. Przykła-

dową matrycę, wykorzystywaną przy wytwarzania zacze­pów kątowych typu ZK przed­stawiono na rysunku 7.4.



Rys. 7.4. Matryca zacze­pów kątowych typu ZK

Rozwiązaniem opisanych wyżej problemów jest rozwój automatyzacji procesu, co oznacza wymianę pras sterowanych manualnie na urządzenia z w pełni automatyczną kontrolą produkcji. Kontrola ta jest szczególnie istotna na etapie podawania materiału do prasy. Na tym etapie wymagane jest aby zarówno skok podawanego do prasy materiału (podanie fragmentu materiału), jak również hamowanie tego procesu zachodziły automatycznie i były poddawane permanentnej kontroli odbywającej się przy pomocy czujników laserowych.

Ulepszenie 1.

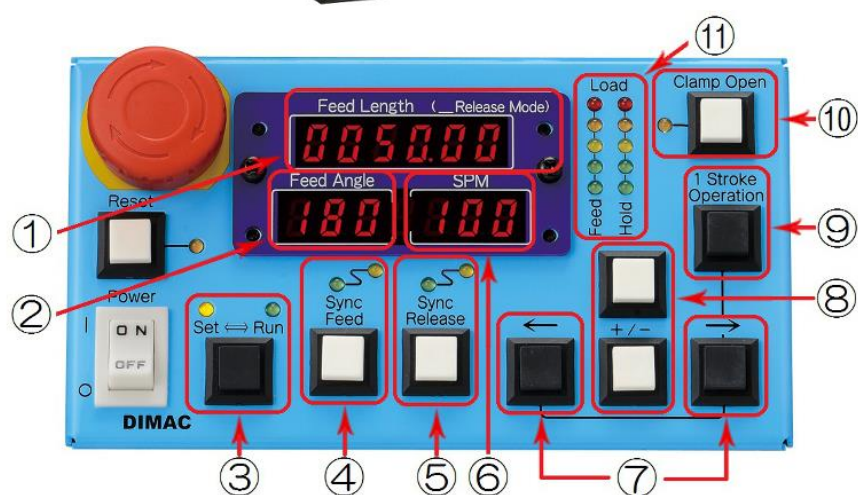
Tak postawione kryteria procesu produkcji pozwoliły na zaproponowanie kompleksowej modernizacji linii produkcyjnej stosowanej w firmie „Dach i Strych”, polegającej na zastosowaniu zautomatyzowanych urządzeń wytwarzających zacze­py kąto­we typu ZK. Po analizie oferty producentów tego typu urządzeń, jako najefektywniejsze zaproponowano rozwiązanie firmy MUFFATO [37].

W skład proponowanej linii produkcyjnej wchodzi:

- prasa mimośrodowa Muffato model CC 65 R (rys. 7.5),
- podajnik elektroniczny DIMAC model J15 (rys. 7.6),
- rozwijak zmotoryzowany (rys. 7.7).



Rys. 7.5. Prasa mimośrodowa firmy Muffato, model CC 65 R [38]



Rys. 7.6. Podajnik elektroniczny DIMAC model J15 oraz panel sterujący [39]



Rys. 7.7. Zmotoryzowany rozwijak uzupełniający zaproponowany zestaw produkcji zaczepów kątowych ZK [40]

Zaproponowana zmodernizowana linia produkcyjna pozwala na pełną automatyzację procesu produkcji oraz zdalne programowanie pracy urządzeń.

Podstawowym urządzeniem w zaproponowanej zmodernizowanej linii produkcyjnej jest prasa mimośrodowa firmy *Muffato* CC 65 R. Urządzenie to charakteryzują następujące cechy techniczne:

- nacisk: 65 t,
- zmienny skok mimośrodu w zakresie od 8 do 120 mm,
- liczba uderzeń na minutę: 140,
- hydrauliczny system przeciążenia,
- zespół pneumatycznego hamulca ciernego,
- zmotoryzowana (automatyczna) regulacja suwaka,
- półautomatyczna (lub automatyczna) zmiana skoku,
- układ automatycznego smarowania.

Dodatkowe poszerzenie zakresu automatyzacji, w tym również w aspekcie kontroli wyrobu można uzyskać dzięki zastosowaniu podajnika elektronicznego DIMAC.

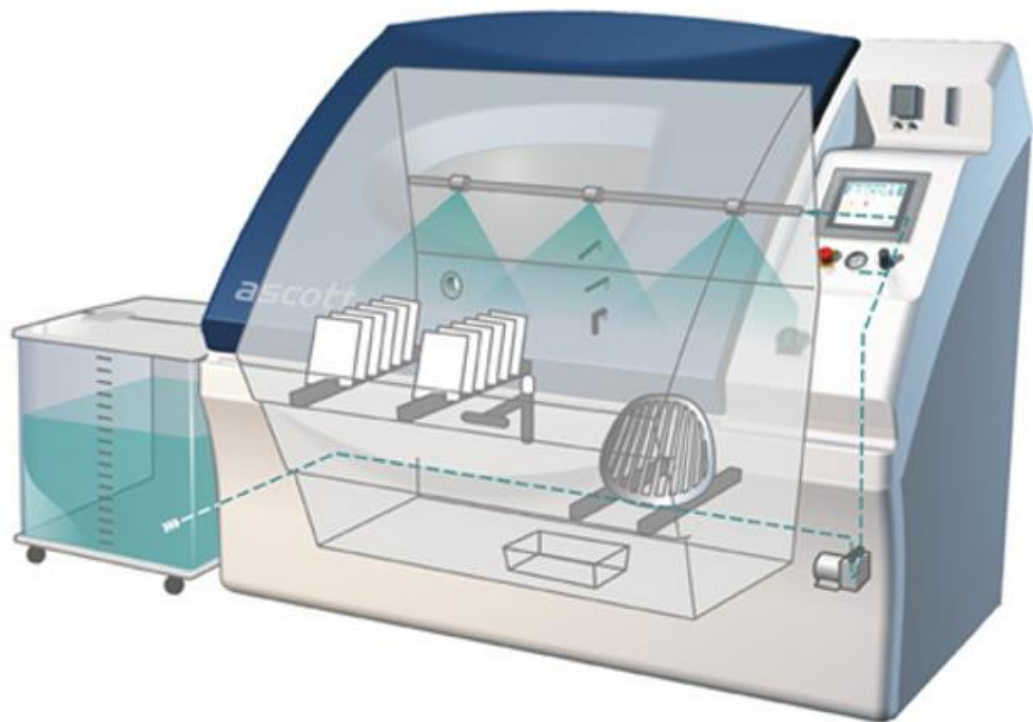
Podajnik ten pozwala on na zainstalowanie dodatkowego czujnika końca taśmy oraz panelu elektronicznego w celu peryferyjnego sterowania urządzeniem na odległość.

Tak zmodernizowana linia produkcyjna może przyczynić się do znacznego wzrostu efektywności procesu wytwarzania zacze­pów kątowych typu ZK, głównie przez wyeliminowanie kosztów przesto­jów wywołanych awariami dotychczas stosowanych urządzeń sterownych manualnie. Ponadto pozwoli na ochronę i wydłużenie okresu trwałości matryc wykorzystywanych do produkcji zacze­pów kątowych typu ZK. Finalnie może również przyczynić się do poszerzenia oferty wyrobów ponad te stosowane w chwili obecnej.

Oprócz modernizacji linii produkcyjnej zacze­pów kątowych ZK firmy „Dach i Strych”, w trakcie analizy zaproponowano zmiany zaplecza technologicznego zakładu w zakresie kontroli gotowych wyrobów, które firma posiad w swojej ofercie handlowej. Zakres opisanych niżej, zaproponowanych ulepszeń technologicznych dotyczył głównie możliwości prowadzenia badań cech fizycznych materiałów, z których produkowane są stropodachy oraz lekkie konstrukcje ścian osłonowych.

Ulepszenie 2 to uzupełnienie wyposażenia zakładu o komorę solną w celu permanentnej kontroli materiałów z uwagi na zachodzące procesy korozyjne.

Produkowane przez firmę „Dach i Strych” elementy lekkich stropodachów pełnych oraz ścian osłonowych, są wykonywane z materiałów narażonych na działanie czynników zewnętrznych, co niesie za sobą ryzyko ich korozji. Dlatego, aby podnieść autonomiczność firmy w zakresie badań takich elementów pod kątem odporności na korozję, proponowane jest wyposażenie zaplecza technologicznego w komorę solną (rys. 7.8). Testy korozyjne w mgłę solnej stanowią badania kontrolne materiałów budowlanych i są zaliczane do badania jakości procesu technologicznego. Ze względu na zalecane w ostatnich latach na europejskim rynku budowlanym podejście, polegające na projektowaniu obiektów z uwzględnieniem ich trwałości, wyposażenie zaplecza technologicznego w komorę solną, może zwiększyć konkurencyjność firmy „Dach i Strych” na rynku polskim.



Rys. 7.8. Przykładowa komora solna (natryskowa) firmy Ascott [41]

Ulepszenie 3. Dotyczy rozszerzenia możliwości inspekcji cech fizycznych gotowych wyrobów budowlanych produkowanych przez firmę „Dach i Strych” dzięki kontroli „in situ” po ich wbudowaniu. W tym celu, aby w sposób ciągły móc monitorować jakość montowanych elementów, jak również jakość samego ich montażu konieczne jest wyposażenie firmy w kamerę termowizyjną. Proponuje się kamerę termowizyjną o parametrach zbliżonych do urządzenia np. firmy Flir serii T640 (rys. 7.9). Zgodnie z kartą producenta charakteryzuje się ona [13]:

- czułością termiczną $<0,03^{\circ}\text{C}$ ($<30\text{mK}$),
- rozdzielczością przestrzenną IFOV równą $0,68$ mrad,
- rozdzielczością detektora równą (640×480) .



Rys. 7.9. Kamera termowizyjna Flir T640 [13]

Takie parametry pozwalają z dużą precyzją przeprowadzić pomiar pola temperatur zarówno na powierzchniach ścian osłonowych jak i stropodachów w obiektach budowlanych.

Dysponowanie na placu budowy tego typu narzędziem może przyczynić się do wyeliminowania niezamierzonych błędów w trakcie montażu oraz pozwoli na weryfikację materiałów zamawianych od innych producentów, które wchodzą w skład stropodachów płaskich i lekkich konstrukcji ścian osłonowych wykonywanych przez firmę „Dach i Strych”.

Ulepszenie 4. Ostatnią propozycją na udoskonalenie wyposażenia zaplecza technologicznego firmy „Dach i Strych” jest zakup zrywarki do badań cech wytrzymałościowych w warunkach pracy statycznej. Z uwagi na fakt, że elementy stropodachów oraz konsol stanowiących szkielet konstrukcji ścian osłonowych muszą posiadać ściśle określone cechy wytrzymałościowe, możliwość prowadzenia niszczących badań statycznych na terenie firmy zwiększyłoby jej autonomię oraz zredukowałoby koszty ponoszone na zlecenie tego typu badań jednostkom zewnętrznym. Biorąc pod uwagę zakres obciążeń, które oddziałują na elementy nośne produkowanych przez firmę „Dach i Strych” elementów stropodachów i ścian osłonowych w warunkach eksploatacji, zaproponowano urządzenie firmy INSTRON 600DX [42] (rys. 7.10).

INSTRON DX600 jest urządzeniem do przeprowadzania badań niszczących dla próbek materiałowych, w tym również materiałów wykorzystywanych w budownicz-

twie. Maksymalne obciążanie wynosi 600kN. Zmienność prędkości wynosi od 0,1 do 76 mm/min. Urządzenie dokonuje pomiaru z dokładnością $\pm 0,25\%$. Wyposażone jest w tensometryczne głowice pomiarowe 600kN oraz cyfrowy przetwornik pomiaru przemieszczeń.



Rys. 7.10. Zrywarka statyczna firmy INSTRON serii 600DX [42]

7.1. Analiza efektywności proponowanej modyfikacji zaplecza technologicznego w aspekcie czasu pracy i kosztów produkcji

W ramach tego etapu wykonano analizę efektywności zastosowania zestawu *Muffato* w kontekście czasu produkcji oraz nakładów finansowych. Składowe zestawy oraz orientacyjne ceny wynikające z oferty producenta po odliczeniu możliwych rabatów zestawiono w tabeli 7.1 i 7.2. W zestawach tych uwzględniono różne ceny matryc umożliwiających uzyskanie różnych typów zaczepów.

Tabela 7.1.

Zestawienie cen poszczególnych składowych zaproponowanego zestawu do produkcji elementów Zk-0n lub 1 lub 2

Element zestawu	Cena producenta
<i>Prasa mimośrodowa firmy Muffato, model CC 65 R</i>	220 000,00 zł
<i>Podajnik elektroniczny DIMAC model J15 oraz panel sterujący</i>	53 000, 00 zł
<i>Zmotoryzowany rozwijak</i>	22 000,00 zł
<i>Matryca do wytwarzania zacze­pów kąto­wych typu Zk-0n lub 1 lub 2</i>	125 000,00 zł
łącznie	420 000,00 zł

Tabela 7.2.

Zestawienie cen poszczególnych składowych zaproponowanego zestawu do produkcji elementów Zk-3 lub 4

Element zestawu	Cena producenta
<i>Prasa mimośrodowa firmy Muffato, model CC 65 R</i>	220 000,00 zł
<i>Podajnik elektroniczny DIMAC model J15 oraz panel sterujący</i>	53 000, 00 zł
<i>Zmotoryzowany rozwijak</i>	22 000,00 zł
<i>Matryca do wytwarzania zacze­pów kąto­wych typu Zk-3 lub 4</i>	155 000,00 zł
łącznie	450 000,00 zł

W ramach oceny efektywności w kontekście czasu potrzebnego na wyprodukowanie danej partii łączników typu ZK-0n, 1, 2, 3 i 4 przyjęto, iż roczna produkcja tych elementów wynosi 1 000 000 sztuk rocznie. Dodatkowo, na podstawie informacji uzyskanej w firmie, uszczegółowiono dane dotyczące proporcji produkowanych łączników. Udział zacze­pów poszczególnych typów względem przyjętej liczby wszystkich produkowanych w ciągu roku elementów zestawiono w tabeli 7.3.

Tabela 7.3.

Liczba poszczególnych typów zacze­pów produkowanych na przestrzeni jednego roku

Typ zacze­pu	Liczba sztuk produkowanych w ciągu roku
<i>ZK-0n</i>	400 000 szt.
<i>ZK-1</i>	240 000 szt.
<i>ZK-2</i>	160 000 szt.
<i>ZK-3</i>	60 000 szt.
<i>ZK-4</i>	140 000 szt.
łącznie	1 000 000 szt.

Przyjmując orientacyjną liczbę 7000 dziennie produkowanych sztuk zacze­pów typu ZK-0n, 1 i 2 oraz 3000 sztuk zacze­pów typu ZK-3 i 4, skonfrontowano wydajność obecnie zainstalowanych urządzeń z proponowanym zestawem firmy *Muffato*. Zgodnie z charakterystykami technicznymi [37], główne urządzenie czyli prasa, jest w stanie wyprodukować na minutę pracy 140 zacze­pów typu ZK-0n, 1 i 2 oraz 70 zacze­pów typu ZK-3 i 4. W tabeli 7.4 przedstawiono wyniki dotyczące czasu potrzebnego na wyprodu­kowanie założonych partii elementów z wykorzystaniem istniejących urządzeń (4 sztuki) oraz pasy *Muffato*.

Tabela 7.4.

Czas potrzebny na wyprodukowanie danej partii zacze­pów z wykorzystaniem urządzeń istniejących oraz zaproponowanego zestawu *Muffato*

Typ zacze­pu	Liczba sztuk	Czas (dni) potrzebny na wyproduko­wanej danej liczby sztuk przy wykorzy­staniu 4 istniejących pras	Czas (dni) potrzebny na wyproduko­wanie danej liczby sztuk przy zastosowaniu prasy <i>Muffato</i>	Procentowy zysk wy­nikający z redukcji czasu produkcji
ZK-0n	400 000 szt.	14,5	8	$(14,5-8)/14,5 \cdot 100 \% = 44,83 \%$
ZK-1	240 000 szt.	8,5	5	$(8,5-5)/8,5 \cdot 100 \% = 41,18 \%$
ZK-2	160 000 szt.	6	3,5	$(6-3,5)/6 \cdot 100 \% = 41,67 \%$
ZK-3	60 000 szt.	5	2,5	$(5-2,5)/5 \cdot 100 \% = 50,0 \%$
ZK-4	140 000 szt.	12	6	$(12-6)/12 \cdot 100 \% = 50,0 \%$
Łącznie	1000 000 szt.	46	25	$(46-25)/46 \cdot 100 \% = 45,65 \%$

Przyjęto efektywny czas pracy wynoszący 6h

Przyjmując orientacyjną wartość kosztów wynikającą z obsługi danego urządze­nia równą (koszty związane z wynagrodzeniem pracownika, dostawą prądu i utrzyma­niem zaplecza) 100 zł/h wyznaczono, całkowity koszt obsługi potrzebnej do wytworze­nia łącznej liczby przewidywanych sztuk produktu z wykorzystaniem 4 zainstalowanych aktualnie urządzeń wynosi 147 200 zł. Z kolei koszty te w przypadku tylko jednego za­proponowanego zestawu wynoszą około 20 000 zł. Stanowi to 86,41 % redukcji wzglę­dem kosztów pierwotnych ponoszonych na obsługę urządzeń starego typu. Przyjmując powyższe dane, oczekiwany okres zwrotu inwestycji nowego urządzenia do automa-

tycznej produkcji wyniesie ok. 4 lat. Okres ten zakłada szacowany popyt na poziomie 1 000 000 sztuk rocznie. W przypadku zwiększenia popytu czas ten ulegnie skróceniu.

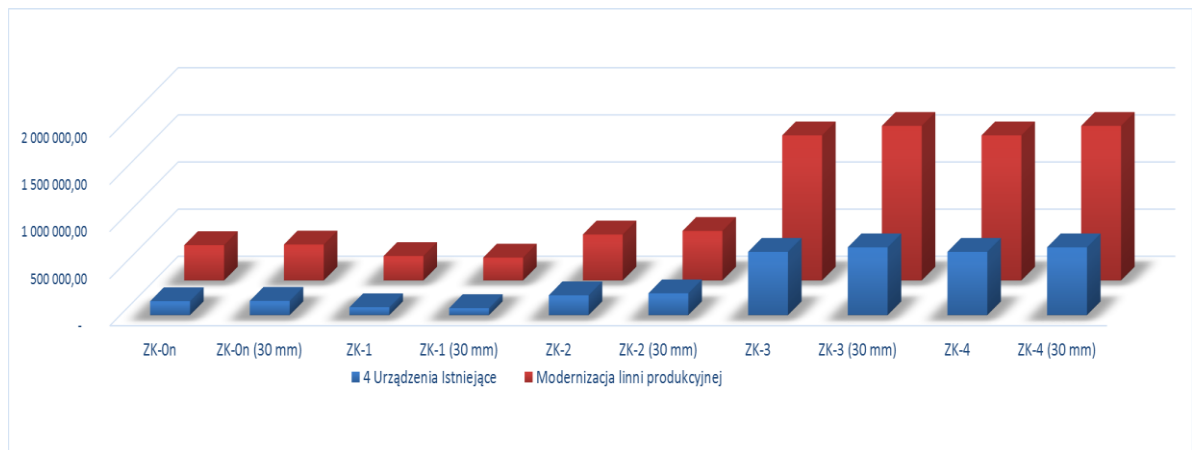
Ostatecznie przeprowadzono analizę kosztów w przypadku optymalnej produkcji rocznej, dla poszczególnych zaczeów, którą można uzyskać wykorzystując stan zaplecza technologicznego przed i po jego potencjalnej modernizacji. W tym celu wykorzystano ceny poszczególnych produktów w dostawie hurtowej (z wykorzystaniem 30 % rabatu) oraz koszty materiałowe ich produkcji. Dane te zestawiono w tabeli 7.5.

Tabela 7.5.

Zestawienie cen jednostkowych wykorzystywanych w sprzedaży hurtowej z przyjętym rabatem równym 30 %

Typ zaczeu	Cena za sztukę po uwzględnieniu rabatu 30 %	Orientacyjne koszty materiałowe	Jednostkowa cena ostateczna produktu
ZK-0n	0,57 zł	0,22 zł	0,35 zł
ZK-0n (30 mm)	0,63 zł	0,27 zł	0,36 zł
ZK-1	0,35 zł	0,10 zł	0,25 zł
ZK-1 (30 mm)	0,39 zł	0,15 zł	0,24 zł
ZK-2	0,76 zł	0,30 zł	0,46 zł
ZK-2 (30 mm)	0,84 zł	0,35 zł	0,49 zł
ZK-3	4,11 zł	1,30 zł	2,81 zł
ZK-3 (30 mm)	4,34 zł	1,35 zł	2,99 zł
ZK-4	4,11 zł	1,30 zł	2,81 zł
ZK-4 (30 mm)	4,34 zł	1,35 zł	2,99 zł

Dalej przyjęto graniczne możliwości technologiczne istniejącego zaplecza oraz proponowanej linii produkcyjnej. Symulowano przebieg produkcji w okresie 1 miesiąca dla każdego z zaczeów indywidualnie. Określono możliwą liczbę produkowanych elementów uwzględniając jedynie uwarunkowania mechaniczne i czas możliwej pracy urządzeń abstrahując od rzeczywistego popytu na dany produkt. Dla uzyskanej liczby uwzględniono cenę poszczególnych typów zaczeów, koszty materiałowe i koszty związane z obsługą. Maksymalną liczbę możliwych do wyprodukowania elementów danego typu wraz z ceną po uwzględnieniu kosztów produkcji zestawiono w tabeli 7.6.

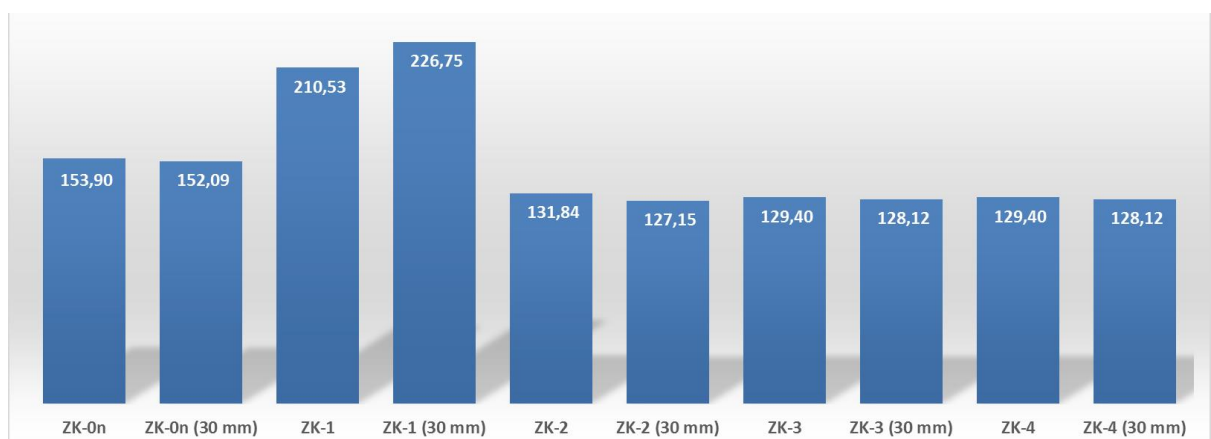


Rys. 7.11. Wartości zysków (zł) odpowiadające maksymalnej możliwej liczbie produkowanych elementów poszczególnych typów

Tabela 7.6.

Maksymalna liczba możliwych do wyprodukowania elementów danego typu zestawiono z wykorzystaniem obecnej i proponowanej linii produkcyjnej

Typ zaczepek	Maksymalna liczba możliwych do wyprodukowania elementów na wszystkich urządzeniach istniejącego zaplecza technologicznego szt. / cena zł	Maksymalna liczba możliwych do wyprodukowania elementów na zaproponowanej linii produkcyjnej szt. / cena zł
ZK-0n	616 000 / 147 664,00 zł	1108800 / 374 915,20 zł
ZK-0n (30 mm)	616 000 / 151 360,00 zł	1108800 / 381 568,00 zł
ZK-1	616 000 / 83 600,00 zł	1108800 / 259 600,00 zł
ZK-1 (30 mm)	616 000 / 74 360,00 zł	1108800 / 242 968,00 zł
ZK-2	616 000 / 210 496,00 zł	1108800 / 488 012,80 zł
ZK-2 (30 mm)	616 000 / 231 440,00 zł	1108800 / 525 712,00 zł
ZK-3	264000 / 671 176,00 zł	554400 / 1 539 709,60 zł
ZK-3 (30 mm)	264000 / 718 960,00 zł	554400 / 1 640 056,00 zł
ZK-4	264000 / 671 176,00 zł	554400 / 1 539 709,60 zł
ZK-4 (30 mm)	264000 / 718 960,00 zł	554400 / 1 640 056,00 zł



Rys. 7.12. Rozkład względnego procentowego wzrostu zysku produkcji poszczególnych elementów z zastosowaniem ulepszonej linii produkcyjnej

Za analizy uzyskanych rezultatów wynika, że zastosowanie zaproponowanej modyfikacji linii produkcyjnej pozwala zwiększyć względną wysokość zysków nawet do 226,75 % w przypadku produkcji maksymalnej liczby zaczepów kątowych typu ZK-1 (30 mm). Najniższy wzrost zysów osiągnięto dla zaczepów kątowych typu ZK-2 (30 mm), który wynosi 127,15 % w stosunku do ceny pierwotnej uzyskanej dla linii produkcyjnej składającej się z czterech aktualnie zainstalowanych urządzeń.

8. OCENA TECHNOLOGII PROCESU WZNOSZENIA DACHÓW W RAMACH INWESTYCJI BUDOWLANYCH PROWADZONYCH PRZEZ FIRMĘ „DACH I STRYCH”

W ramach oceny procesu wznoszenia dachów przez firmę „Dach i Strych” przeanalizowano dwie inwestycje na terenie Krakowa. Pierwszą z nich była rekonstrukcja więźby dachowej oraz wymiana pokrycia dachowego budynku stanowiącego siedzibę Banku Pekao SA przy ulicy Pijarskiej 1 w Krakowie. Drugą inwestycją była budowa stropodachu budynku hali przy ulicy Rakowickiej 29.

8.1. Rekonstrukcja dachu budynku Banku Pekao SA przy ulicy Pijarskiej w Krakowie

Prace wykonawcze przeprowadzono w okresie od marca do lipca 2017 roku.

W ramach inwestycji wymieniono elementy konstrukcji więźby dachowej. Nowe pokrycie zrealizowano w formie blachy tytanowo-cynkowej gr. 0,7 mm (na rąbek stojący). Blachę mocowano do podłoża z desek grubości 32 mm. Między blachą a drewnianym podłożem zastosowano matę strukturalną. Warstwy blachy zamocowane zostały za pomocą zaczepów kątowych typu: ZK-1, Zk0-n, ZK-2. W trakcie prac na połaciach dachowych zamontowano ławy kominiarskie oraz płotki śniegowe.

Widok zrekonstruowanego dachu budynku przy ul. Pijarskiej 1 w Krakowie przedstawiono na rys. 8.1, 8.2 i 8.3.



Rys. 8.1. Widok zrekonstruowanego dachu od strony południowo-wschodniej [19]



Rys. 8.2. Widok zrekonstruowanego dachu od strony północno-wschodniej [19]



Rys. 8.3. Widok fragmentu dachu od strony południowo-wschodniej [19]

8.2. Budowa stropodachu nad budynkiem hali przy ul. Rakowickiej w Krakowie

Prace wykonawcze przeprowadzono w okresie od sierpnia do listopada 2017 roku. W ramach inwestycji nad budynkiem typu halowego halowego, wykonano lekki stropodach pełny, o następującym układzie warstw: przekrycie z blachy trapezowej, ciężka paroizolacja (Rockfol), twarda wełna mineralna (Monrock pro 2 x 13 cm), membrana separacyjna z opłotem oraz pokrycie z blachy tytanowo-cynkowej gr. 0,8 mm (VmZinc Pigmento Red) mocowanej za pomocą zaczepów ZK-3 i ZK-4.

Na rysunkach od 8.4 do 8.8 przedstawiono poszczególne etapy robót montażowych stropodachu nad budynkiem hali przy ul. Rakowickiej 29 w Krakowie.



Rys. 8.4. Widok dachu z ułożoną warstwą nośną w postaci blachy trapezowej [18]



Rys. 8.5. Widok fragmentu dachu z ułożoną warstwą paroizolacji oraz pakietami twardej wełny mineralnej [18]

Rys. 8.6.
Fragment zawiniętej membrany
separacyjnej połączonej
z wełną mineralną łącznikami
typu GOK nad murkiem ogniowym [18]



Rys. 8.7. Fragment połączeni dachowej przygotowanej do montażu
pokrycia z blachy [18]



Rys. 8.8. Fragment połączeni dachowej z zamontowaną blachą tytanowo-cynkową
(VmZinc Pigmento Red) [18]

8.3. Ustalanie ulepszonego rozwiązania stropodachu pod kątem własności termicznych i akustycznych

W ramach oględzin frontu wykonywanych prac związanych z budową opisanych inwestycji stwierdzono, że:

- wszyscy pracownicy na czas montażu na wysokości byli odpowiednio zabezpieczeni i posiadali odzież ochronną,
- prace przebiegały zgodnie z zaplanowanym harmonogramem.
- odpady stalowe zostały zełomowane, natomiast opakowania (folie), w których na plac budowy dostarczano materiały zostały przekazane do recyklingu,
- teren budowy po wykonaniu zakończeniu prac był oczyszczony z wszelakich pozostałości,
- nie stwierdzono, aby zarówno proces technologiczny budowy, jak i materiały wykorzystywane w jej trakcie źle oddziaływały na środowisko,
- nie odnotowano również skarg mieszkańców sąsiednich budynków w trakcie wykonywania prac.

9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

9.1. Ustalanie ulepszonego rozwiązania stropodachu pod kątem własności termicznych i akustycznych

Badania przeprowadzono w dwóch etapach.

W pierwszym etapie miały one na celu wskazanie kierunków modyfikacji konstrukcji stropodachów stosowanych przez firmę „Dach i Strych”. Bazując na dotychczas stosowanych rozwiązaniach konstrukcyjno-materiałowych, przeprowadzono wielowariantową optymalizację pod kątem ich własności termoizolacyjnych. Pozwoliło to na wskazanie minimalnej grubości warstwy termoizolacyjnej, przy której spełnione są wymagania określone przez warunki techniczne [5] zarówno na okres do końca 2020 roku, jak i od początku roku 2021. Badania te przeprowadzono z uwzględnieniem liczby łączników wiążących poszczególne warstwy stropodachu oraz produkowanych przez firmę „Dach i Strych” zaczepów kątowych do mocowania arkuszy z blachy stanowiącej pokrycie dachowe. Analiza przypadków dla różnej liczby zaczepów, a tym samym łączników teleskopowych, była konieczna z jednej strony z uwagi na wytyczne techniczne [9] dotyczące właściwego mocowania pokrycia dachowego z blachy do felcowania, w

których uwzględniono siły generowane przez parcie lub ssanie wiatru, a z drugiej ze względu na wpływ łączników na charakterystykę termiczną przegrody.

Efektom tych analiz było wytypowanie przegrody, dla której liczba łączników przypadających na 1 m² powierzchni pokrycia dachowego była największa, przy jednoczesnym spełnieniu wymagań stawianych przez [5]. Finalnie, przyjmując kryteria obowiązujące do końca 2020 roku oraz po ich zmianie od początku 2021 roku, wytypowano dwa rozwiązania stropodachów zróżnicowane pod kątem grubości warstwy termoizolacyjnej. Termoizolacja tych przegród wykonana jest z płyt z wełny mineralnej *Paroc Ros 60 + Paroc Ros 30*. Grubości warstw termoizolacji, odpowiadające im współczynniki przenikania ciepła przegród i graniczne liczby łączników zestawiono w tabeli 9.1.

W efekcie stwierdzono, że dla wytypowanych rozwiązań straty ciepła spowodowane przez łączniki i zaczepy nie powodują konieczności ich ograniczenia. Jednocześnie wytypowane rozwiązania przegród wskazują na minimalną grubość warstwy termoizolacyjnych, które spełniają obowiązujące warunki techniczne bez konieczności redukcji liczby łączników przypadających na 1 m² powierzchni stropodachu.

Tabela 9.1.

Współczynniki przenikania ciepła U dla wytypowanych rozwiązań stropodachów

Grubość warstwy termoizolacyjnej z wełny mineralnej <i>Paroc Ros 60</i> [mm]	Grubość warstwy termoizolacyjnej z wełny mineralnej <i>Paroc Ros 30</i> [mm]	Wartość współczynnika przenikania ciepła U [W/m ² K]	Maksymalna liczba łączników na 1 m ² powierzchni pokrycia dachowego [szt.]
Analizowany okres stosowalności przegrody: do końca 2020 roku			
160	50	0,18	11
Analizowany okres stosowalności przegrody: od początku 2021 roku			
200	50	0,15	11

W ramach pierwszego etapu badań przeprowadzono również analizę obliczeniową własności akustycznych stropodachów. W tym celu stworzono bazę rozwiązań analogicznych do tych, które zostały wyłonione na etapie kalibracji przegród pod kątem właściwości termoizolacyjnych. Ostatecznie uzyskano wartości wskaźników akustycznych R_w , R_{A1} , R_{A2} dla analizowanych przegród, które zestawiono w tabeli 9.2.

Tabela 9.2.

Wskaźniki izolacyjności akustycznej dla wytypowanych rozwiązań stropodachów

Typ analizowanej przegrody	Wskaźnik izolacyjności akustycznej R_w [dB]	Wskaźnik izolacyjności akustycznej R_{A1} [dB]	Wskaźnik izolacyjności akustycznej R_{A2} [dB]
Paroc ROS 30 (50 mm) + ROS 60 (160 mm)	44	42	35
Paroc ROS 30 (50 mm) + ROS 60 (200 mm)	46	44	38

W ramach tego etapu przeprowadzono alternatywną analizę własności akustycznych w oparciu o zastosowanie wybranych metod sztucznej inteligencji. Modele prognostyczne zostały utworzone na podstawie informacji zawartej w specjalnie utworzonej bazie danych o parametrach akustycznych przegród dachowych różnych producentów o budowie zbliżonej do analizowanych prototypów. Były to dane z pomiarów laboratoryjnych. W wyniku analiz uzyskano wartości wskaźnika izolacyjności akustycznej R_w , które zestawiono w tabeli 9.3.

Tabela 9.3.

Wartości wskaźników izolacyjności akustycznej dla wytypowanych przegród uzyskane w wyniku symulacji utworzonego modelu sieci neuronowej typu MLP

Typ analizowanej przegrody	Wskaźnik izolacyjności akustycznej R_w
<i>Model sieci neuronowej typu MLP</i>	
Paroc ROS 30 (50mm) + ROS 60 (160 mm)	42,49 dB
Paroc ROS 30 (50mm) + ROS 60 (200 mm)	43,16 dB
<i>Model SVM w ujęciu regresyjnym</i>	
Paroc ROS 30 (50mm) + ROS 60 (160 mm)	40,71 dB
Paroc ROS 30 (50mm) + ROS 60 (200 mm)	42,63 dB

W dalszym ciągu opracowania, dane zestawione w tabeli 9.3 były traktowane jako wartości weryfikujące teoretycznie ustalone wcześniej parametry, które zestawiono w tabeli 9.2.

Następnie przeprowadzono analizę porównawczą wytypowanego prototypu stropodachu z rozwiązaniami znajdującymi się w ofercie innych producentów, w tym również zagranicznych (system *Kalzip* firmy *Tata Steel Construction* [43]). W wyniku porównania kosztów budowy oraz cech technicznych (z uwzględnieniem technologii i

trwałości) rozwiązań z pokryciem montowanym na rąbek stojący stwierdzono, że stropodachach *DiS System*:

- jest konkurencyjny pod względem kosztów budowy w porównaniu do wszystkich analizowanych rozwiązań stropodachów,
- cechuje się najkrótszym czasem montażu stropodachu,
- zachowuje szczelność przy uwzględnieniu odkształceń rozszerzalności termicznej blachy pokrycia,
- nie poddaje się deformacjom i wypaczeniom pokrycia dachowego co podnosi trwałość wybudowanego przekrycia,
- zachowuje cechy akustyczne zgodne z warunkami technicznymi (w związku z zastosowaniem izolacji z twardej wełny mineralnej),
- nie powoduje występowania dodatkowych mostków termicznych.

W drugim etapie, wykorzystując optymalną konstrukcję stropodachu spośród rozwiązań stosowanych przez firmę „Dach i Strych”, wytypowaną na podstawie analizy przedstawionej w pierwszym etapie, zaproponowano jego modyfikację polegającą na zmniejszeniu grubości przegrody przy zachowaniu podobnych właściwości izolacyjnych. Celem takiego podejścia było znalezienie sposobu obniżenia zużycia materiału termooizolacyjnego oraz obniżenie kosztów budowy przegrody. W wyniku rozeznania danych technicznych materiałów dostępnych na rynku, które mogły stanowić alternatywę dla pierwotnie zastosowanej wełny mineralnej, zdecydowano o przeprowadzeniu analizy możliwości wdrożenia rozwiązania z izolacją z płyt z pianki poliuretanowej PUR.

W wyniku zastosowania procedury optymalizacyjnej, której kryterium był współczynnik przenikania ciepła, wyznaczono minimalną grubość płyty z pianki PUR, przy której konstrukcja stropodachu spełnia wymagania stawiane przez [5] na okres do końca 2020 roku oraz od początku roku 2021. Analizy przeprowadzono w środowisku Matlab. W obliczeniach uwzględniono gradację liczby łączników i zaczepów kątowych, których liczba zależy od ekspozycji dachu na działanie wiatru i jest ujęta w wewnętrznych wytycznych stosowanych przez firmę „Dach i Strych” [9]. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 9.4 i 9.5.

Tabela 9.4.

Optymalne grubości warstwy termoizolacyjnej z pianki PUR dla $U_{max} = 0,18 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (wartość obowiązująca do końca roku 2020) w zależności od liczby łączników

	Liczba łączników [szt./m ²]									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Minimalna grubość termoizolacji z pianki PUR [cm]	10,71	10,72	10,73	10,74	10,74	10,75	10,76	10,77	10,78	10,78

Tabela 9.5.

Optymalne grubości warstwy termoizolacyjnej z pianki PUR dla $U_{max} = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (wartość obowiązująca od początku roku 2021) w zależności od liczby łączników

	Liczba łączników [szt./m ²]									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Minimalna grubość termoizolacji z pianki PUR [cm]	12,94	12,95	12,96	12,97	12,98	12,99	13,00	13,01	13,02	13,03

W wyniku przeprowadzonych badań ustalono minimalną grubość warstwy termoizolacyjnej z pianki PUR. I tak, uwzględniając przepisy obowiązujące do końca 2020 roku grubość ta wynosi 11 cm (por. tab. 9.4), natomiast przy warunkach technicznych wchodzących w życie od 2021 roku - 13 cm (por. tab. 9.5). Wykonywana równocześnie analiza oddziaływania liczby łączników i zaczepów stabilizujących pokrycie dachowe z blachy do felcowania wykazała, że ich wyższa przewodność cieplna nie wpływa znacząco na pogorszenie właściwości termicznych przegrody opisywanych współczynnikiem przenikania ciepła U [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]. Wynika stąd wniosek, że przy tego typu modyfikacji konstrukcji stropodachu nie istnieją ograniczenia w zakresie granicznej liczby łączników, co czyni to rozwiązanie elastycznym w kontekście możliwej lokalizacji i ekspozycji dachu.

Uzyskany prototyp konstrukcji stropodachu zbadano dodatkowo pod kątem izolacyjności akustycznej. W tym celu, wyznaczono analityczny wskaźnik izolacyjności akustycznej R_w . Wyniki obliczeń uzyskanych dla dwóch wyżej opisanych wariantów przegród zestawiono w tabeli 9.6.

Tabela 9.6.
Wskaźnik izolacyjności akustycznej R_w dla wytypowanych rozwiązań stropodachów

Typ analizowanej przegrody	Wskaźnik izolacyjności akustycznej R_w [dB]
Stropodach z warstwą termoizolacyjną z pianki PUR gr. 110 mm	30
Stropodach z warstwą termoizolacyjną z pianki PUR gr. 130 mm	31

Uzyskane wartości wskaźnika R_w są wyraźnie niższe od tych uzyskanych dla przegród z warstwami termoizolacyjnymi z płyt z wełny mineralnej. Jednak należy zwrócić uwagę że, dokładna ocena przydatności proponowanych rozwiązań stropodachu jest uzależniona od przeznaczenia obiektu budowlanego oraz poziomu dźwięku A . Dlatego kompletną ocenę izolacyjności akustycznej można przeprowadzić dopiero w przypadku projektowania konkretnej inwestycji o ściśle określonym przeznaczeniu i w określonym otoczeniu determinującym natężenie dźwięku.

Zakres opisanych wyżej badań uzupełniono o etap trzeci, w którym przeprowadzono analizę numeryczną MES problemu stacjonarnego przepływu ciepła przez przegrodę.

Obliczenia przeprowadzono dla dwóch wcześniej wytypowanych rozwiązań stropodachu, których grubości warstw termoizolacyjnych zostały ustalone na poziomie gwarantującym zgodność z warunkami technicznymi [5] wchodzącymi w życie od początku 2021 roku. I tak, analizowano stropodach z termoizolacją z wełny mineralnej (*Paroc ROS 30 + Paroc ROS 60*) o grubości 250 mm oraz stropodach z termoizolacją z pianki poliuretanowej PUR grubości 130 mm.

Na podstawie porównania rozkładu temperatur w obu wyżej wymienionych przegrodach stwierdzono, że w przypadku stropodachu z izolacją z wełny mineralnej, większa jest strefa temperatur dodatnich przy wewnętrznej powierzchni przegrody. Jednakże, proporcjonalnie większa jest też strefa temperatur ujemnych ($< 273,15$ K) przy powierzchni zewnętrznej, co wskazuje na konieczność stosowania warstw izolacji przeciwwilgociowych (paroizolacji, wiatroizolacji), aby uniemożliwić zawilgocenie przegrody oraz zapewnić jej efektywność i trwałość. Z kolei w przypadku termoizolacji z pianki poliuretanowej, strefa przegrody znajdująca się w obszarze ujemnych tempera-

tur, jest relatywnie mniejsza, co uwzględniając mniejszą (niż wełny mineralnej) nasiąkliwość pianki PUR zmniejsza ryzyko jej zawilgocenia i degradacji.

Analizując wartości strumienia ciepła q (W/m^2) stwierdzono, że w obu badanych przegrodach jest on równomierny, a jego wartość oscyluje wokół $5 W/m^2$ – dla przegrody z wełną mineralną oraz $6 \div 6,5 W/m^2$ – dla przegrody z płytą z pianki termoizolacyjnej PUR. Jedyne zaburzenia widoczne są w strefach, gdzie warstwy stropodachu połączone są wkrętami stalowymi. Wzdłuż łączników przepływ strumienia ciepła jest zdecydowanie wyższy niż w pozostałej części przegrody, co spowodowane jest wysoką wartością współczynnika przewodzenia ciepła dla stali ($\lambda = 58 W/m^2K$). Jednak zaburzenia te jedynie nieznacznie propagują na przylegające elementy analizowanych przegród. Przegroda, w której zastosowano wełnę mineralną cechuje się mniejszą podatnością na tego typu zaburzenia. Niemniej jednak, nawet w przypadku przegrody z pianką PUR zasięg rozprzestrzeniania się tych zaburzeń jest niewielki i w ekstremalnych przypadkach zachodzi w promieniu do 10 mm od obrysu łącznika. Uzyskane wyniki pozwalają na akceptację przyjętej modyfikacji oraz wdrożenie do zastosowań praktycznych.

9.2. Porównanie innych cech technicznych oraz kosztów stosowania pianki poliuretanowej PUR i wełny mineralnej w rozwiązaniach stropodachów

W pracy przeprowadzono analizę porównawczą kosztów materiałowych realizacji wytypowanych rozwiązań stropodachów z termoizolacją z płyt z wełny mineralnej oraz z pianki poliuretanowej PUR. Bazując na danych udostępnionych przez firmę „Dach i Strych” ustalono, że zastosowanie pianki PUR pozwala obniżyć koszty budowy stropodachu (o cechach fizycznych zgodnych z warunkami technicznymi [5], które będą obowiązywać od początku 2021 roku) o około 16% w stosunku do rozwiązania z izolacją z wełny mineralnej.

Ponadto należy zwrócić uwagę, że ciężar objętościowy pianki poliuretanowej PUR jest zdecydowanie niższy niż ciężar wełny mineralnej. Zatem w analizowanym przypadku wartość obciążenia powierzchniowego przypadającego na $1 m^2$ stropodachu dla rozwiązania z izolacją z płyt z pianki PUR jest prawie dziesięciokrotnie niższa niż dla stropodachu, w którym zastosowano warstwę termoizolacji z wełny mineralnej. Jest to bardzo istotne, ponieważ może przyczynić się do zmniejszenia wyężenia elementów nośnych konstrukcji dachu, co z kolei może pozwolić na przyjęcie smuklejszych prze-

krojów elementów konstrukcyjnych, a tym samym ograniczyć koszty realizacji całej inwestycji.

Relatywnie lekki materiał izolacyjny, którym jest pianka poliuretanowa PUR, stanowi również zaletę w aspekcie kosztów transportu oraz technologii i kosztów wykonawstwa. Ułatwiony transport i montaż, może przyczynić się do skrócenia czasu realizacji, eliminacji błędów wykonawczych oraz obniżenia ryzyka wypadków przy pracy. W aspekcie bezpieczeństwa, fakt iż materiał ten jest bezpyłowy dodatkowo podnosi bezpieczeństwo pracy i ogranicza negatywny wpływ na środowisko.

Z punktu widzenia trwałości, należy zauważyć, że pianka PUR wykazuje wysoką odporność na działanie czynników organicznych i nieorganicznych. Dlatego stosowanie tego materiału może opóźnić proces degradacji elementu i ograniczyć koszty eksploatacyjne związane z koniecznością prowadzenia jego konserwacji i napraw.

9.3. Ocena zaplecza technologicznego oraz propozycje modernizacji

W tej części opracowania przedstawione zostały propozycje potencjalnych zmian i modyfikacji zaplecza technologicznego firmy „Dach i Strych”. Propozycje te dotyczyły głównie modernizacji linii produkcyjnej zaczepów kątowych ZK-1, 2, 3 i 4. Zaproponowano ostatecznie zestaw urządzeń (prasa mimośrodowa, podajnik i rozwijak), które eliminują obsługę manualną na rzecz automatyzacji procesu z dodatkową możliwością sterowania zdalnego (peryferyjnego). Pozwoli to zwiększyć efektywność produkcji oraz wydłużyć trwałość wykorzystywanych w tym procesie matryc, które dotychczas ulegały uszkodzeniom mechanicznym co spowalniało proces i prowadziło do przyspieszonej eksploatacji sprzętu.

Dodatkowo zaproponowano poszerzenie zaplecza firmy w zakresie sprzętu pomiarowego do monitorowania cech fizycznych oraz mechanicznych (wytrzymałościowych) materiałów wykorzystywanych do budowy stropodachów płaskich i ścian osłonowych. Pozwoli to na uniezależnienie się w zakresie niezbędnej kontroli jakości procesu technologicznego co pozwoli firmie „Dach i Strych” obniżyć koszty pośrednie oraz podnieść rangę wytwarzanych wyrobów na polskim rynku. Dodatkowo, kontrola jakości może zostać przeniesiona z zaplecza technologicznego na plac budowy, gdzie firma od wielu lat wykonuje inwestycje w zakresie budowy stropodachów płaskich i ścian elewacyjnych.

W ramach tego etapu podjęto analizę efektywności zaproponowanej modyfikacji zaplecza technologicznego. Analizę tą przeprowadzono wg kryteriów którymi były: czas produkcji, koszty produkcji oraz zysk finansowy. Szczegółowe wyniki zamieszczono w ramach rozdziału 7.1. Natomiast w tabeli 9.7 zestawiono wszystkie uzyskane wyniki świadczące o efektywności zaproponowanej linii produkcyjnej.

Tabela 9.7.

Charakterystyki opisujące efektywność zaproponowanej modernizacji linii produkcyjnej w aspekcie czasu produkcji, redukcji kosztów i spodziewanych zysków

Procentowa redukcja czasu produkcji (dni) względem istniejących elementów wyposażenia zaplecza technologicznego przy uwzględnieniu produkcji 1 000 000 sztuk zacze- pów (por. tab. 7.4)	Procentowa redukcja kosztów wytwarzania przy uwzględnieniu produkcji 1 000 000 sztuk zacze- pów (por. tab. 7.4)	Średni procentowy wzrost zysków przy założeniu maksymalnej możliwej technologicznie produkcji zacze- pów poszczególnych typów wg kryteriów podanych przez producenta Muffato (por. tab. 7.6 i rys. 7.12)
45,65 %	86,41 %	151,73 %

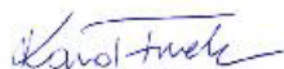
9.4. Ocena wybranych realizacji inwestycji związanych ze wznoszeniem dachów

W trakcie realizacji pracy autorzy dokonali wizji lokalnej dwóch realizacji prowadzonych przez firmę „Dach i Strych” na terenie Krakowa. Były to inwestycje w ramach których wznoszono nową (budynek halowy przy ul. Rakowickiej 29) bądź rekonstruowano starą konstrukcję stropodachu (budynek przy ul. Pijarskiej 1). W trakcie wizji lokalnych, które autorzy opracowania przeprowadzali na każdym z etapów realizacji opisywanych inwestycji stwierdzono nienaganne przygotowanie logistyczne oraz przestrzeganie przepisów bezpieczeństwa pracy. Szczegółowo kwestię tą opisano w ramach podsumowania rozdziału 8 niniejszego opracowania.

dr inż. Janusz Rusek



dr hab. inż. Karol Firek



mgr inż. Michał Witkowski



Kraków, 24.01.2018 r.