

Na prawach rękopisu

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
Politechniki Wrocławskiej

**IDENTYFIKACJA MODELU ZNISZCZENIA  
ELEWACJI WENTYLOWANEJ  
Z OKŁADZINĄ Z PŁYT WŁÓKNISTO-  
CEMENTOWYCH POD WPŁYWEM  
ODDZIAŁYWANIA POŻARU**

**Raport serii PRE nr 2/2023  
Praca doktorska**

mgr inż. Łukasz Zawiaślak

Słowa kluczowe:

płyty włóknisto-cementowe

elewacje wentylowane

model zniszczenia

badania wielkoskalowe

identyfikacja zniszczenia

temperatura pożarowa

Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Schabowicz

Promotor pomocniczy: dr inż. Paweł Sulik

Wrocław, kwiecień 2023

Pusta strona

Autor:

mgr inż. Łukasz Zawislak

.....

Politechnika Wroclawska  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
Katedra Budownictwa Ogólnego  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław  
tel. 71 320 23 45 tel./fax. 71 320 36 45  
e-mail: lukasz.zawislak@pwr.edu.pl

Raport został złożony w Redakcji Wydawnictw Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w kwietniu 2023 r.

Lista odbiorców:

Recenzenci	3 egz.
Promotor	1 egz.
Promotor pomocniczy	1 egz.
Autor	1 egz.
Biblioteka Główna PWr	1 egz.
Archiwum	1 egz.

---

Razem: 8 egz.

Pusta strona

*W pierwszej kolejności, za wkład merytoryczny, nieocenioną pomoc, konstruktywna krytykę i pouczająca polemikę serdecznie dziękuję promotorom Panu prof. dr hab. inż. Krzysztofowi Schabowiczowi i Panu dr inż. Pawłowi Sulikowi.*

*Kolejno, co było dla mnie równie ważne w trakcie tworzenia mojej pracy, dziękuję moim bliskim za wsparcie i wiarę we mnie i moje możliwości.*

*A prace doktorska chciałbym zadedykować wszystkim pasjonatom tematu.*

Pusta strona

## SPIS TREŚCI

<u>WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ, SKRÓTÓW I DEFINICJI STOSOWANYCH W ROZPRAWIE</u> .....	10
1. <u>WPROWADZENIE W PROBLEMATYKĘ PRACY</u> .....	13
1.1 <u>Podstawowe informacje o elewacji wentylowanej</u> .....	13
1.2 <u>Płyta włóknisto-cementowa jako okładzina zewnętrzna elewacji wentylowanej</u> .....	16
1.3 <u>Problematyka elewacji wentylowanej w warunkach pożarowych</u> .....	19
2. <u>PROBLEM NAUKOWY, CEL, ZAKRES PRACY, TEZY ROZPRAWY DOKTORSKIEJ</u> .....	23
2.1 <u>Problemem naukowy</u> .....	23
2.2 <u>Cel pracy</u> .....	23
2.3 <u>Zakres pracy</u> .....	24
2.4 <u>Tezy rozprawy doktorskiej</u> .....	25
2.5 <u>Oryginalne elementy pracy</u> .....	25
3. <u>ANALIZA LITERATURY PRZEDMIOTU</u> .....	27
3.1 <u>Wymagania formalne stawiane płytom włóknisto-cementowym i elewacji wentylowanej w zakresie pożarowym</u> .....	27
3.1.1 <u>Wymagania formalne dla okładzin elewacji wentylowanej</u> .....	31
3.1.2 <u>Badania globalne kompletnych systemów elewacji</u> .....	37
3.2 <u>Bezpieczeństwo pożarowe elewacji wentylowanej</u> .....	50
3.2.1 <u>Rozprzestrzenianie się pożaru pomiędzy kondygnacjami po elewacji</u> .....	51
3.2.2 <u>Efekt ciągu kominowego</u> .....	61
3.2.3 <u>Odpadanie elementów elewacji wentylowanej</u> .....	72
3.3 <u>Podstawowe informacje o płytach włóknisto-cementowych</u> .....	74
3.3.1 <u>Charakterystyka płyt włóknisto-cementowych</u> .....	78
3.3.2 <u>Skład płyt włóknisto-cementowych</u> .....	80
3.3.3 <u>Destrukcja płyt włóknisto-cementowych pod wpływem wysokich temperatur</u> .....	85
3.4 <u>Podsumowanie analizy literatury przedmiotu</u> .....	87
4. <u>ZAKRES BADAŃ WŁASNYCH</u> .....	90
4.1 <u>Okładziny elewacyjne wykorzystane w modelach wielkoskalowych</u> .....	91
4.1.1 <u>Płyty włóknisto-cementowe</u> .....	93
4.1.2 <u>Pozostałe materiały</u> .....	95
4.2 <u>Stanowisko badawcze modeli rzeczywistych elewacji wg ITB – procedura PB LP-091/1/11-2014 [85]</u> .....	96
4.2.1 <u>Przykładowe opomiarowanie stanowiska badawczego</u> .....	101
4.2.2 <u>Stanowisko badawcze modeli rzeczywistych elewacji</u> .....	103

4.3	<u>Stanowisko badawcze elewacji w budynku modelowym</u> .....	104
4.4	<u>Badanie wytrzymałości na zginanie MOR wg PN-EN 12467 [114]</u> .....	107
4.5	<u>Stanowisko badawcze z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego</u> .....	110
4.6	<u>Stanowisko badawcze z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego</u> .....	112
4.7	<u>Ocena stopnia destrukcji płyt włóknisto-cementowych</u> .....	114
4.8	<u>Metodyka badań</u> .....	115
5.	<u>WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA</u> .....	117
5.1	<u>Opis przebiegu badań na modelach wielkoskalowych</u> .....	117
5.1.1	<u>Seria badań A – model rzeczywisty elewacji</u> .....	117
5.1.2	<u>Seria badań B – model rzeczywisty elewacji</u> .....	121
5.1.3	<u>Seria badań C – model rzeczywisty elewacji</u> .....	124
5.1.4	<u>Seria badań D – model rzeczywisty elewacji</u> .....	128
5.1.5	<u>Seria badań E – model rzeczywisty elewacji</u> .....	130
5.1.6	<u>Seria badań F – elewacja na modelowym budynku</u> .....	133
5.1.7	<u>Seria badań G – elewacja na modelowym budynku</u> .....	135
5.1.8	<u>Seria badań H – model rzeczywisty elewacji</u> .....	138
5.1.9	<u>Seria badań I – model rzeczywisty elewacji</u> .....	141
5.1.10	<u>Seria badań J – model rzeczywisty elewacji</u> .....	144
5.1.11	<u>Wyniki z termopar dla badanych przypadków modeli rzeczywistych elewacji</u> .....	147
5.1.12	<u>Lokalne mapy temperatur dla badanych przypadków modeli rzeczywistych elewacji</u>	172
5.1.13	<u>Globalne mapy temperatur dla badanych przypadków modeli rzeczywistych elewacji</u> .....	185
5.1.14	<u>Wyniki z termopar dla badanych przypadków elewacji na budynku modelowym</u> .....	189
5.1.15	<u>Lokalne mapy temperatur dla badanych przypadków elewacji na budynku modelowym</u> .....	192
5.1.16	<u>Porównanie badań wielkoskalowych</u> .....	194
5.2	<u>Analiza destrukcji płyt włóknisto-cementowych podczas oddziaływania pożaru</u> .....	195
5.2.1	<u>Seria badań D</u> .....	195
5.2.2	<u>Seria badań J</u> .....	223
5.2.3	<u>Seria badań F</u> .....	230
5.2.4	<u>Podsumowanie badań na próbkach</u> .....	241
5.3	<u>Globalne mapy destrukcji modelu rzeczywistego</u> .....	242
6.	<u>IDENTYFIKACJA MODELU ZNISZCZENIA ELEWACJI WENTYLOWANEJ Z OKŁADZINĄ Z PŁYT WŁÓKNISTO-CEMENTOWYCH POD WPŁYWEM ODDZIAŁYWANIA POŻARU</u> .....	248
7.	<u>IDENTYFIKACJA GLOBALNEGO PROBLEMU ODPADANIA ELEMENTÓW OKŁADZIN ELEWACYJNYCH W WARUNKACH ODDZIAŁYWANIA POŻARU</u> .....	251



8.	<u>WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE</u> .....	253
8.1	<u>Podsumowanie</u> .....	253
8.2	<u>Wnioski</u> .....	255
8.3	<u>Proponowane kierunki badań</u> .....	258
8.4	<u>Praktyczne zastosowanie</u> .....	258
9.	<u>BIBLIOGRAFIA</u> .....	260
	<u>STRESZCZENIE</u> .....	270
	<u>ABSTRACT</u> .....	272

## WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ, SKRÓTÓW I DEFINICJI STOSOWANYCH W ROZPRAWIE

$a$  – odkształcenie podczas zginania

**ACM** (z ang. *aluminium composite materials*) – kompozyt składający się z dwóch warstw lakierowanych płyt aluminiowych (warstwy zewnętrzne) z rdzeniem wykonanym z izolacji

$b$  – szerokość próbki

**Budynek modelowy** – budynek odwzorowujący rzeczywisty budynek o gabarytach budynku rzeczywistego przeznaczony na cele badań

$e$  – grubość próbki

$E_D$  – moduł Younga

**Elewacja wentylowana** (z ang. *ventilated facade*) – rozwiązanie techniczne wierzchniej warstwy ściany zewnętrznej, składające się z okładziny zewnętrznej elewacyjnej, mechanicznie lub adhezyjnie przymocowanej do podkonstrukcji (nazywanej również rusztem). Ruszt jest przymocowany za pomocą konsol do ściany konstrukcyjnej zewnętrznej budynku. Pomiędzy konsolami układana jest izolacja termiczna

**EN** – norma europejska

**ETICS** – systemem ociepleń ścian zewnętrznych budynków, polega na ułożeniu na ścianach płyt styropianowych, warstwy z zaprawy zbrojonej siatką, a następnie na wykonaniu warstwy zewnętrznej z tynku cienkowarstwowego

$f$  – ugięcie

$F$  – siła

**HPL** – duroplastyczny laminat wysokociśnieniowy

**HRR** (z ang. *Heat Release Rate*) – szybkość wydzielania ciepła podczas pożaru

**LOP** (z ang. *Load of Proportionality*) – granica proporcjonalności – granica stosowalności prawa Hooke’a, czyli granica, do której za przyrost wydłużenia jednostkowego odpowiadają proporcjonalne przyrosty naprężeń

$l_s$  – rozstaw podpór

**Model rzeczywisty** – specjalnie przygotowana platforma badawcza przeznaczona do przeprowadzenia badań lub analiz w zakresie rozwoju pożaru, odwzorowująca rzeczywistą ścianę budynku. Wyróżnia się modele rzeczywiste w skali średniej i dużej. W przypadku skali średniej model ma wymiary jednej kondygnacji rzeczywistego budynku, w przypadku skali dużej – dwóch kondygnacji

**Model wielkoskalowy** – platforma badawcza (model rzeczywisty) lub budynek modelowy o skali odpowiadającej zwykłemu budynkowi, przygotowany do przeprowadzenia badań, np. w zakresie rozwoju pożaru

**MOR** – wytrzymałość na zginanie

**Niezawodność** – prawdopodobieństwo zdarzenia, że wyrób lub element użytkowany w określonych warunkach będzie zachowywał zdolność do spełnienia stawianych mu wymagań w określonym przedziale czasu użytkowania

**Okladziny zewnętrzne elewacyjne** – reprezentacyjna warstwa wierzchnia elewacji wentylowanych, mogą być wykonane z różnych materiałów. Są to elementy nieobciążalne, przenoszące jedynie ciężar własny oraz oddziaływania środowiskowe, tj. śnieg, wiatr czy temperaturę

**PN** – polska norma

**Pożar** – niekontrolowany, samoistny proces spalania materiałów palnych w miejscu i w czasie do tego nieprzeznaczonym

$S$  – pole przekroju próbki

**SEM** (z ang. *scanning electron microscope*) – skaningowy mikroskop elektronowy

**Termopara** – urządzenie, które w sposób analogowy kontroluje temperaturę w stanie rzeczywistym

**$W_f$**  – praca łamania

**WT** – Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (tekst jednolity z 2022 roku. poz. 1225)

# 1. WPROWADZENIE W PROBLEMATYKĘ PRACY

## 1.1 Podstawowe informacje o elewacji wentylowanej

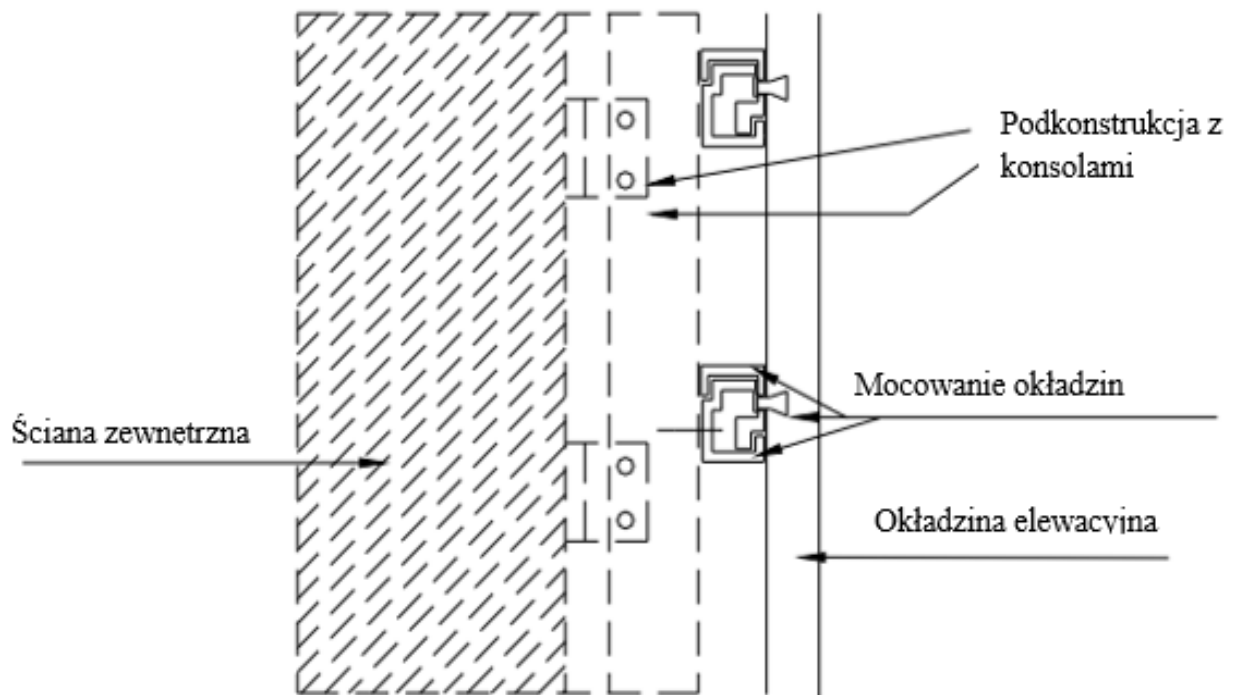
Elewacja wentylowana jest to rozwiązanie techniczne elewacji składającej się z zewnętrznej okładziny elewacyjnej, mechanicznie lub adhezyjnie przymocowanej do podkonstrukcji, nazywanej również rusztem. Ruszt jest z kolei przymocowany w sposób mechaniczny do ściany zewnętrznej budynku. Montaż podkonstrukcji do ściany odbywa się zazwyczaj poprzez konsole – elementy o możliwej regulacji, utrzymujące odpowiednią płaszczyznę okładziny zewnętrznej na nieidealnie wykonanej ścianie zewnętrznej – konstrukcyjnej lub osłonowej. Poprzez elewację wentylowaną rozumie się kompletny system składający się z okładziny, rusztu, konsol i izolacji, który jest przeznaczony do montażu na ścianie zewnętrznej. Warstwa izolacyjna jest zazwyczaj zamocowana po stronie zewnętrznej ściany pomiędzy konsolami. Występują również systemy nieposiadające izolacji w tym miejscu – dotyczy to głównie systemów typu lekkiego. Ściana zewnętrzna jest zazwyczaj ścianą konstrukcyjną wykonaną w formie tradycyjnej z następujących wyrobów budowlanych: ceramika, beton komórkowy, silikaty itp., beton lub żelbet wykonywany na miejscu lub w formie prefabrykatów, drewno lub stalowe ramy. Ściany zewnętrzne mogą również spełniać wyłącznie funkcję osłonową z wyłączeniem funkcji konstrukcyjnej. Zewnętrzne elementy okładzinowe, nazywane okładzinami zewnętrznymi bądź okładzinami elewacyjnymi, mogą być wykonane z różnych materiałów, w tym z: płyt włóknisto-cementowych, płyt betonowych, elementów stalowych, elementów ceramicznych, elementów kompozytowych itp. Okładziny zewnętrzne elewacyjne są elementami nieobciążalnymi, na które oddziałują warunki atmosferyczne, tj. śnieg, wiatr, temperatura, przenoszą one obciążenia ciężaru własnego na inne elementy systemu elewacji wentylowanej.

Elewacja wentylowana – jako kompletny zestaw – składa się z wielu komponentów, wyrobów budowlanych. Dokumentem stawiającym wymagania dla kompletnego systemu elewacji wentylowanej jest europejska aprobaty techniczna o nr EAD 090062-00-0404 [39] (ETA z ang. EAD). Wcześniej podstawą do wystawienia oceny był dokument ETAG 034-1 [40] nazywany zbiorem wytycznych EOTA do Europejskich Aprobatach Technicznych. Wymagania przedstawione w europejskiej aprobacie technicznej o nr EAD 090062-00-0404 [39] oraz ETAG 034-1 [40] dotyczą kompletnego systemu elewacji wentylowanej. Ponadto, poszczególne elementy systemu elewacji wentylowanej muszą spełniać wymagania wynikające z norm na terenie danego kraju. EAD 090062-00-0404 [39] przedstawia dwa warunki konieczne do spełnienia, by system elewacji nazwano elewacją wentylowaną:

1. Odległość między okładziną zewnętrzną, a warstwą izolacyjną lub podłożem, przestrzeń wentylacyjna, nazywana również pustką powietrzną wynosi co najmniej 20 mm. Ta przestrzeń powietrzna może być zmniejszona lokalnie od 5 do 10 mm, w zależności od okładziny i podkonstrukcji (rusztu), pod warunkiem weryfikacji, czy nie wpłynie to negatywnie na funkcję sprawności elewacji.

2. Otwory wentylacyjne, inaczej nazywane szczelinami wentylacyjnymi, są przewidziane co najmniej w punkcie bazowym budynku na pograniczu cokołu i właściwej elewacji oraz przy krawędzi dachu i posiadają przekroje poprzeczne wynoszące co najmniej  $50 \text{ cm}^2$  na metr bieżący elewacji.

Przykładowy przekrój kompletnego systemu elewacji wentylowanej przedstawiono na rysunku 1.1. - system z podkonstrukcją mocowany za pomocą konsol do ściany zewnętrznej.



**Rys. 1.1.** Przykładowy system elewacji wentylowanej [1]

W Polsce elewacja wentylowana jako zestaw wyrobów budowlanych musi także spełniać odpowiednie wymagania przedstawione w Europejskiej Aprobacie Technicznej o nr EAD 090062-00-0404 [39]. Elewacje wentylowane w większości przypadków projektowane i wykonywane są zgodnie z indywidualnymi projektami technicznymi elewacji oraz wymaganiami stawianymi przez producentów poszczególnych wyrobów, przykładowo w zakresie montażu tych wyrobów, tj. podkonstrukcja, okładziny itp.

Elewacje wentylowane zgodnie z [39] dzieli się m.in. ze względu na: sposób wentylacji przestrzeni wentylacyjnej, sposób montażu podkonstrukcji, rodzaj zastosowanej podkonstrukcji, materiał z jakiego jest wykonana okładzina zewnętrzna. Europejska Organizacja ds. Oceny Technicznej w wydanej przez nią opinii [42] przedstawiła dodatkowe wytyczne do podziału elewacji wentylowanych ze względu na sposób łączenia okładziny zewnętrznej z podkonstrukcją oraz łączenia poszczególnych płyt.

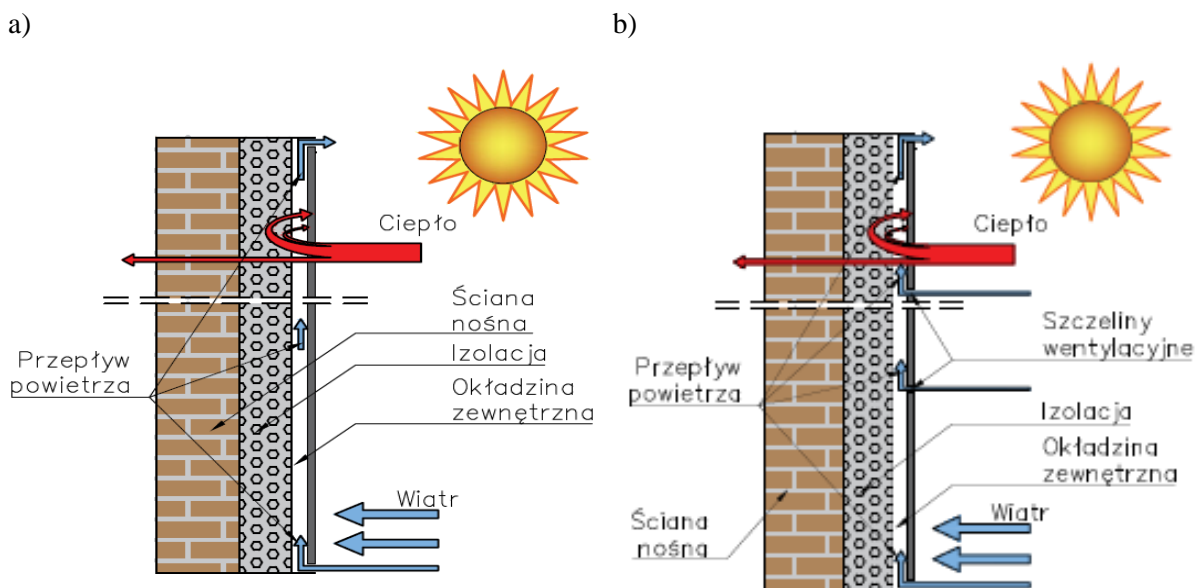
Okładziny zewnętrzne w elewacjach wentylowanych zapewniają możliwość kształtowania wyglądu obiektu poprzez dobór różnego rodzaju materiałów, z których są wykonane oraz dowolną

kolorystykę i fakturę. Okładzina zewnętrzna elewacyjna, wg EAD 090062-00-0404 [39] oraz EOTA ETAG 034-1 [40], musi spełnić szereg wymagań, m.in.: odporność na działanie czynników atmosferycznych, odporność na promieniowanie UV, odporność na opady (np. deszczu), trwałość i odpowiednią odporność ze względu na zmiany temperaturowe, odpowiednią wytrzymałość na ssanie i parcie spowodowane działaniem wiatru itd. Ze względu na powszechność użytkowania najczęściej jako okładziny elewacyjne wykorzystywane są płyty włóknisto-cementowe. Podstawowym ich kolorem jest kolor szary, ale oferowane są również w barwie kolorów RAL i NCS poprzez ich barwienie (technologiczna nazwa: barwione w masie) bądź poprzez malowanie ich powierzchni. Innym, również popularnym materiałem są okładziny wykonane z HPL – duroplastycznego laminatu wysokociśnieniowego oraz kompozytów ACM (z ang. *aluminium composite materials*). Kompozyty ACM składają się one z dwóch warstw lakierowanych płyt aluminiowych z rdzeniem oraz posiadają niemalże nieograniczone możliwości kształtowania. Rdzeń tych kompozytów może być wykonany z różnych materiałów, są to m.in. PIR, PUR czy polietylen. Innymi wyrobami wykorzystywanymi jako okładziny zewnętrzne są m.in. płyty ceramiczne (popularnie nazywane spiekami ceramicznymi lub porcelanowymi), kompozyty wełniane, płyty kamienne itd.

Kolejny element kompletnego systemu elewacji wentylowanej stanowi podkonstrukcja, która jest istotna ze względu na bezpieczeństwo elewacji. To element przenoszący obciążenia z okładzin zewnętrznych, ciśnienie spowodowane oddziaływaniem wiatru, obciążenia własne okładzin zewnętrznych, oddziaływanie spowodowane oparciem się osoby o elewację itd., na ścianę zewnętrzną. Podkonstrukcja, poza zapewnieniem odpowiedniej nośności, musi spełniać warunki stanowiące wartości użytkowe. Nadmierne odkształcanie się okładzin zewnętrznych może spowodować zarysowanie, wgniecenie lub pęknięcie okładziny. Podkonstrukcja może być wykonana z różnych materiałów, m.in. z: aluminium, drewna, stali ocynkowanej, stali kwasoodpornej lub stali nierdzewnej itd. Najpopularniejszym rodzajem podkonstrukcji są podkonstrukcje wykonane z aluminium, cechują się one niskim ciężarem własnym oraz przystępnymi cenami, lub wykonane ze stali ocynkowanej, cechują się one dużą wytrzymałością i nośnością. Podkonstrukcja (ruszt) może mieć różne rozwiązania techniczne – od najprostszej, posiadającej konsole i mocowane do nich pionowe profile, poprzez konstrukcje oparte tylko o poziome profile, aż do najbardziej złożonych systemów podkonstrukcji, opartych o profile mocowane krzyżowo, zawierające profile poziome i pionowe, montowane za pomocą konsol do ściany zewnętrznej. Profile rusztu posiadają kształt zazwyczaj teowników i kątowników, ale producenci decydują się często na wprowadzenie własnych kształtów profili. Konsole wykonane są zazwyczaj z kątowników nierównoramiennych. Wysięg konsoli zależy od odstępów między ścianą zewnętrzną, a okładziną zewnętrzną, niezbędnego do umieszczenia izolacji termicznej i zapewnienia przestrzeni wentylacyjnej. Zazwyczaj mieści się on w przedziale od 200 do 300 mm, a w przypadku systemów dla budynków pasywnych spotykane są nawet odstępów o wysięgu do 500 mm.

Okładziny zewnętrzne montowane mogą być do podkonstrukcji w sposób adhezyjny, poprzez różnego rodzaju kleje, lub mechaniczny, poprzez m.in.: wkręty samowierzące, nity, tylnowkrętki, zawieszki, łapki itp.

Ze względu na sposób wymiany powietrza w przestrzeni wentylacyjnej wyróżnia się dwa typy elewacji wentylowanej – z zamkniętymi oraz z otwartymi złączami. Elewację z zamkniętymi złączami charakteryzuje brak szczelin pośrednich, np. w miejscach połączeń kolejnych płyt okładzin elewacyjnych (przykład przedstawiony został na rysunku 1.2 a). W przypadku elewacji wentylowanej z otwartymi złączami można wyróżnić złącza w kierunku: pionowym, poziomym oraz pionowym i poziomym. Charakteryzują je szczeliny w miejscach połączeń kolejnych płyt okładzin zewnętrznych na elewacji. Wszystkie szczeliny pozwalają na dostawanie się powietrza do przestrzeni wentylacyjnej lub odprowadzanie z niej. Przykład elewacji wentylowanej z otwartymi złączami przedstawiono na rysunku 1.2. b).



**Rys. 1.2.** Podział elewacji wentylowanych z uwagi na sposób wymiany powietrza: a) z zamkniętymi złączami; b) z otwartymi złączami [147]

## 1.2 Płyta włóknisto-cementowa jako okładzina zewnętrzna elewacji wentylowanej

Okładziny zewnętrzne stosowane w kompletnych systemach elewacji wentylowanych muszą spełniać szereg wymagań wymienionych i opisanych w pkt 1.1 oraz inne wyszczególnione w rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, dalej określanym jako WT, [132] i normach branżowych. Poza wymaganiami opisanymi w stosownych normach i rozporządzeniach niezwykle



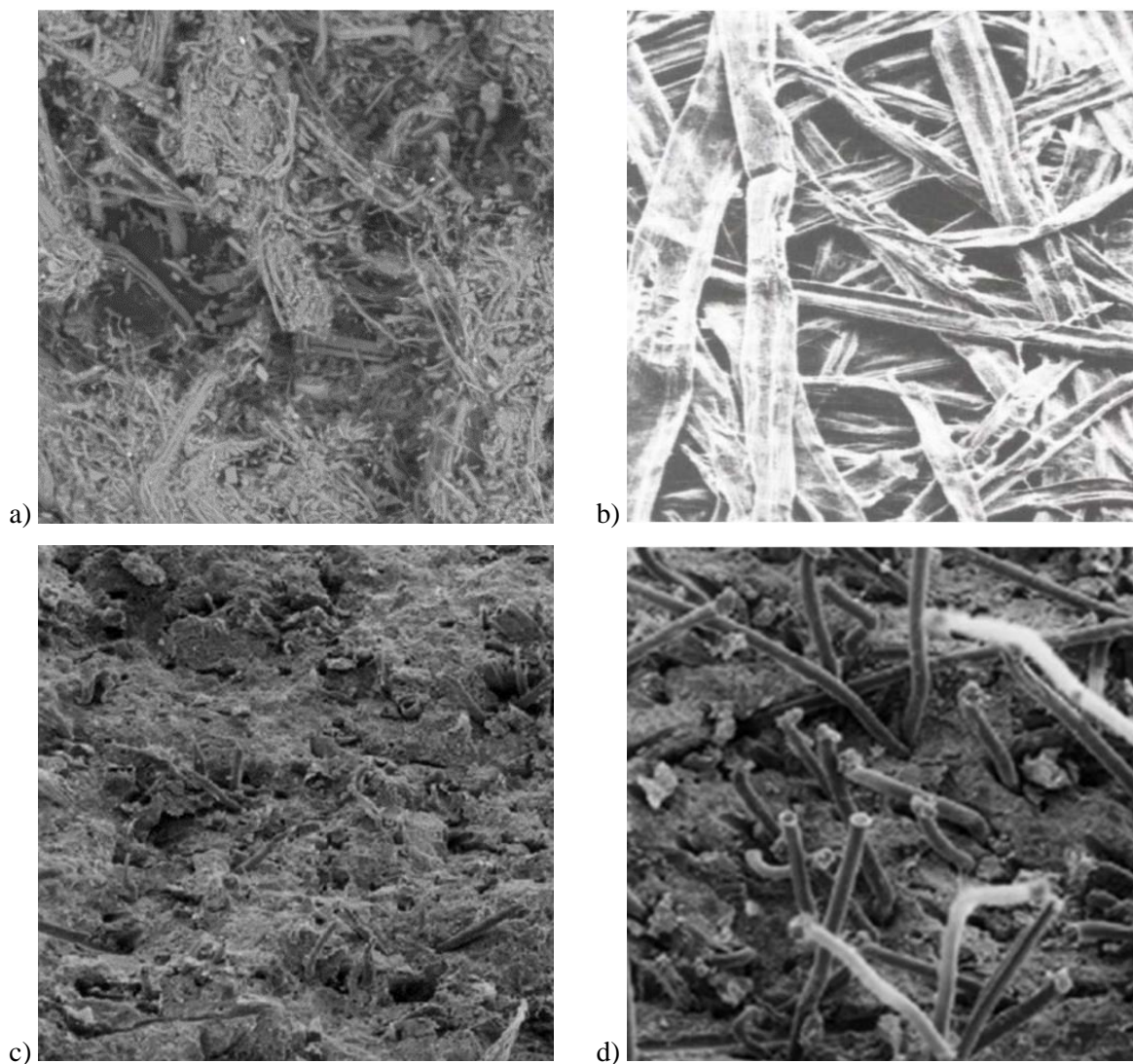
ważna jest ich trwałość, związane z nią koszty utrzymania oraz bezobsługowe użytkowanie takiej elewacji. Rozumie się przez to m.in.: niewybarwienie się elewacji w trakcie kolejnych lat jej użytkowania, brak zarysowań, brak spękań oraz brak zabrudzeń. Wcześniej wymienione parametry są ważne szczególnie w przypadku budynków wysokich, czyli powyżej 25 m, oraz wysokościowych, czyli powyżej 55 m, zgodnie z nomenklaturą wynikającą z WT [132], gdzie dostęp do elewacji jest utrudniony z uwagi na znaczne wysokości. W przypadku elewacji opartych o tynk zewnętrzny, np. elewacji typu ETICS, zabrudzanie i pogarszanie się wyglądu wraz z kolejnymi latami użytkowania jest nagminne.

Okładziny zewnętrzne jak i całe systemy elewacji wentylowanych w odniesieniu do przepisów obowiązujących w Polsce wielokrotnie choćby częściowo muszą być wykonane z materiałów niepalnych wg WT [132]. Ponadto, w Polsce Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych [132], stawia dodatkowo warunek konieczności nieodpadania elementów elewacji podczas występowania pożarów w czasie odpowiadającym klasie budynku. Wszystkie wcześniej wymienione parametry i wymagania wskazują na wyrób budowlany, jakim są płyty włóknisto-cementowe, jako interesujący do rozpatrzenia.

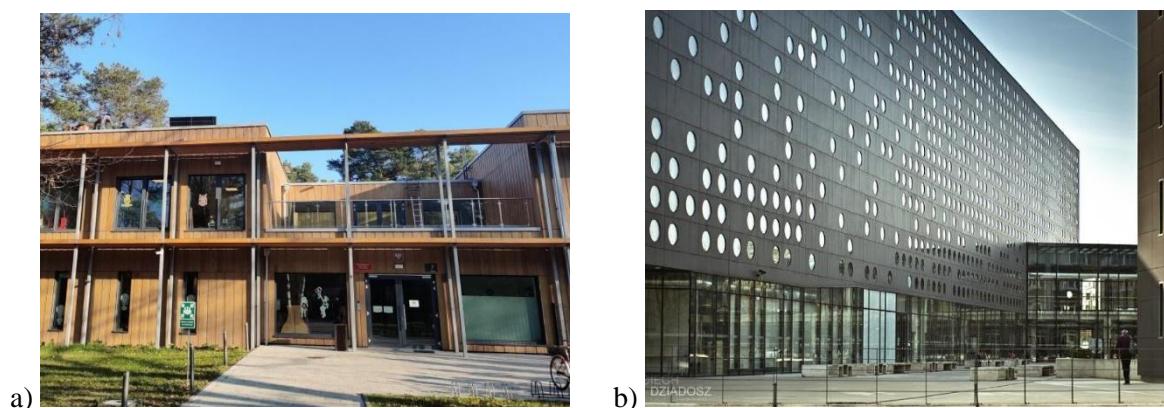
Płyty włóknisto-cementowe to wyrób budowlany stosowany w budownictwie od początku ubiegłego wieku. Początkowo produkt ten nosił nazwę „eternit”, nazwa ta była zbieżna z nazwą najpopularniejszego dostawcy tego wyrobu. Opisany kompozyt cechowały: wytrzymałość, trwałość, niewielki ciężar, odporność na wilgoć i niepalność. Połączenie tych cech w jednym materiale, początkowo nazywanych płytami azbestowo-cementowymi, a później płytami włóknisto-cementowymi, było innowacją na skalę światową, wobec czego materiał ten zyskał dużą popularność. W latach 90. XX wieku wyrób przeszedł transformację i niebezpieczne dla zdrowia włókna azbestowe zastąpiono innymi włóknami, które pozostają neutralne dla zdrowia ludzi.

Obecnie produkowane płyty włóknisto-cementowe składają się z: cementu, włókien celulozowych, włókien syntetycznych oraz różnych dodatków i domieszek, tj. mączki wapiennej, miki, perlitu, kaolinu, mikrosfery [60 – 62]. Włókna wzmacniają strukturę płyty, jeżeli ich procentowy udział zawartości w strukturze płyty wynosi do 10% w stosunku do matrycy cementowej. Przykłady struktury kompozytów włóknisto-cementowych z zastosowaniem różnych typów włókien przedstawiono na rysunku 1.3.

Efekty możliwe do uzyskania przy zastosowaniu elewacji wentylowanej z okładzinami z płyt włóknisto-cementowych na budynkach przedstawiono na rysunku 1.4.



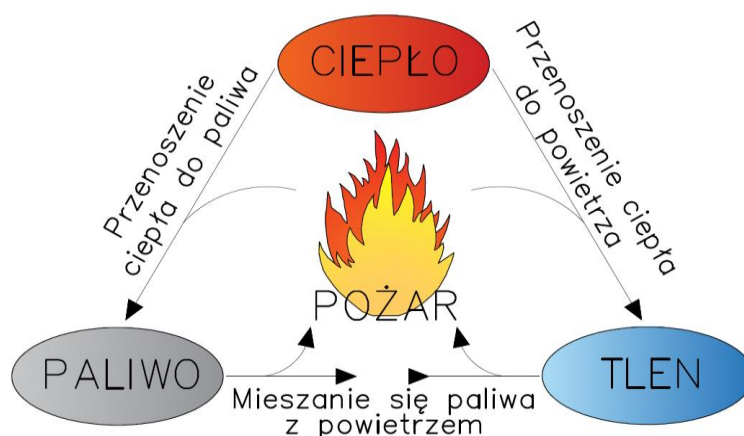
**Rys. 1.3.** Widok: a) włókien azbestu chryzotylowego [68]; b) włókien celulozowych [29];  
c) włókien polialkoholu winylu [128]; d) włókien polipropylenowych [128]



**Rys. 1.4.** Elewacje wentylowane z okładzinami z płyt włóknisto-cementowych: a) przedszkole  
w Podkowie Leśnej [74]; b) budynek C-13 Politechniki Wrocławskiej [69]

### 1.3 Problematyka elewacji wentylowanej w warunkach pożarowych

Elewacje wentylowane, poza zapewnieniem bezpieczeństwa w trakcie normalnego użytkowania, muszą zapewniać bezpieczeństwo w trakcie sytuacji wyjątkowych. Sytuacjami wyjątkowymi są m.in. porywiste wiatry czy huragany, ale też uderzenia, np. samochodem. Inną wyjątkową sytuacją jest pożar, któremu towarzyszą bardzo wysokie temperatury oddziałujące na elewację. Pożar definiuje się natomiast jako niekontrolowany, samoistny proces spalania materiałów palnych w miejscu i w czasie do tego nieprzeznaczonym. Spalanie jest procesem chemicznym, w którym cząsteczki materiału spalanego przechodzą zmiany fazowe, a wytworzona w tym czasie energia jest absorbowana lub wydalana. Aby doszło do procesu pożaru, muszą zaistnieć trzy czynniki jednocześnie, gdzie relacje zachodzące pomiędzy poszczególnymi czynnikami można opisać za pomocą tzw. „trójkąta spalania”. Pierwszym czynnikiem jest ciepło, a dokładniej energia cieplna, która jest podstawowym czynnikiem wywołującym pożar. Kolejnym czynnikiem jest tlen, w którego obecności może zachodzić proces utleniania. Trzecim, ostatnim czynnikiem jest paliwo – materiały, które mają zdolność do utleniania w obecności utleniacza i mogą występować w formie gazowej, cieczy lub ciała stałego. „Trójkąt spalania” wraz z zachodzącymi reakcjami przedstawiono na rysunku 1.5.



Rys. 1.5. Trójkąt spalania [141]

Rozróżnia się dwa podstawowe typy pożarów: „kontrolowany przez paliwo” i „kontrolowany przez tlen”, przy czym w przypadku budynków częściej zdarzają się pożary kontrolowane przez paliwo, z charakterystycznym spalaniem płomieniowym. W przypadku pożarów kontrolowanych przez tlen spalanie odbywa się zazwyczaj w sposób bezpłomieniowy, np. w przypadku pożaru wewnętrznego w zamkniętym pomieszczeniu pożar początkowo jest kontrolowany przez tlen, dopiero po dostaniu się znacznej ilości tlenu, np. po zniszczeniu szyby lub po otwarciu drzwi na korytarz, rozpoczyna się pożar płomieniowy, kontrolowany przez paliwo. W przypadku pożaru zewnętrznego zawsze ma miejsce pożar kontrolowany przez paliwo, ponieważ tlenu jest nieograniczona ilość. Przykład pożaru kontrolowanego przez tlen okładziny zewnętrznej elewacji budynku w Mediolanie we Włoszech, spalania płomieniowego, przedstawiono na rysunku 1.6.



**Rys. 1.6.** Pożar okładziny zewnętrznej elewacji budynku w Mediolanie we Włoszech [66]

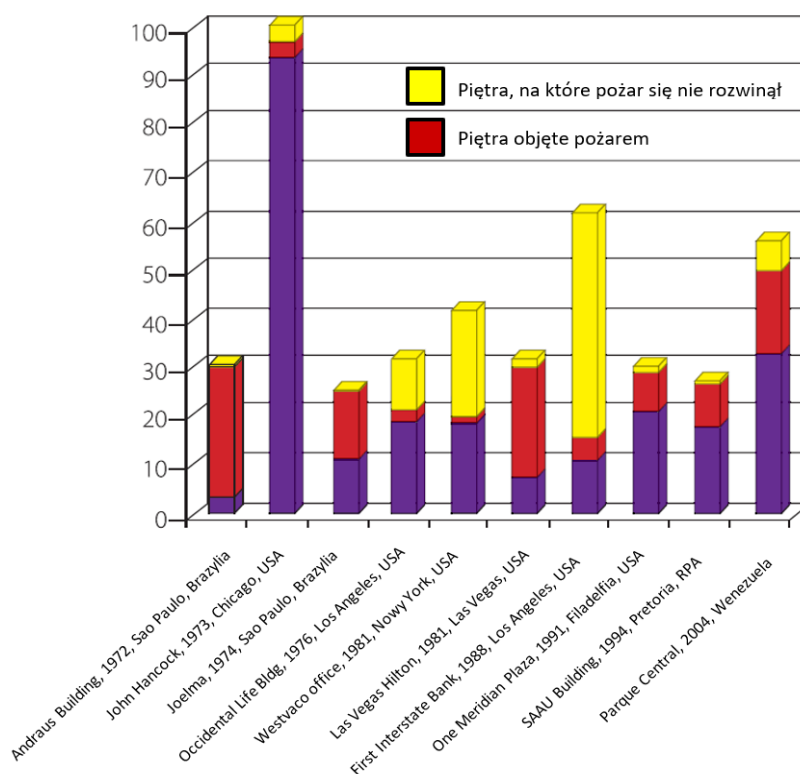
Pomimo szeregu wymagań w zakresie bezpieczeństwa pożarowego budynku i jego ścian zewnętrznych, co jakiś czas mówi się o spektakularnych i jednocześnie tragicznych w skutkach pożarach budynków. Wielokrotnie w przypadku pożaru budynku również rozwija się on po ścianie zewnętrznej. Jest to bardzo niebezpieczne z uwagi na to, iż na elewacji nie ma żadnych barier powstrzymujących pożar przed „pokonywaniem” kolejnych kondygnacji. Przykładem tragicznego w skutkach pożaru budynku, który rozwijał się po elewacji, był pożar Grenfell Tower w Londynie w 2017 r., w którym życie straciły 72 osoby, a ponad 70 zostało rannych [65]. Zdjęcia z tragicznego pożaru w Londynie przedstawiono na rysunku 1.7.



**Rys. 1.7.** Pożar Grenfell Tower w Londynie w 2017 r. [76, 154]

Tak samo jak w przypadku Grenfell Tower, tak i w przypadku innych pożarów budynków, musi wydarzyć się splot zdarzeń, żeby pożar rozwinął się w takim stopniu oraz wydostał się na elewację, powodując przy tym tak katastrofalne skutki.

O'Connor i inni [107], przybliżając zagadnienie problematyki pożarowej elewacji, w szczególności elewacji wentylowanych, opracowali wykres pokazujący zajęcie się kolejnych kondygnacji poprzez wybuch pożaru wewnątrz budynku i jego rozwój po elewacji. Na wykresie 1.1. widać, iż w przypadku braku szybkiego opanowania pożaru przez jednostki straży pożarnej na pewnym etapie pożar staje się niemożliwy do opanowania i rozwijając się, zajmuje pozostałą część kondygnacji powyżej aż do dachu – pola oznaczone czerwonym kolorem.



**Wykres 1.1.** Zajęcie się kondygnacji pożarem podczas wybuchu pożaru w budynkach o dużej liczbie kondygnacji [107]

Temat pożarów, ich rozwoju i efektów występujących przy pożarach w literaturze naukowej został dość obszernie przeanalizowany i przebadany, lecz wyraźnie brak jest odniesienia do elewacji wentylowanej i rozwiązań materiałowych stosowanych w tego typu elewacji. Dotyczy to również okładzin zewnętrznych stosowanych w systemach elewacji wentylowanej. W literaturze naukowej znajduje się niewiele badań materiałowych traktujących o zachowaniu się tych wyrobów budowlanych w warunkach pożaru. Ponadto, zauważyć można braki danych globalnych, w tym wskazań rozkładu temperatur na elewacjach wentylowanych w warunkach pożaru, w szczególności przy wykorzystaniu badań wielkoskalowych.

Autor niniejszej rozprawy, kontynuując tematykę, którą zajmuje się Katedra Budownictwa Ogólnego na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej pod kierownictwem prof. dr hab. inż. Krzysztofa Schabowicza, skupił się na identyfikacji modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożaru. W celu możliwie najlepszego zidentyfikowania sposobu destrukcji płyt oraz efektów wpływających na nie badania zostały wykonane na modelach wielkoskalowych. Modele charakteryzują się bardzo dobrym odniesieniem się do pożarów rozwijających się na budynkach ze względu na zachowaną skalę badania oraz rzeczywiste rozwiązania w zakresie elewacji. Okładziny zewnętrzne wykonane z płyt włóknisto-cementowych w modelach wielkoskalowych posłużyły do pozyskania próbek poddanych oddziaływaniu pożaru, które to kolejno poddano szczegółowej analizie.

## **2. PROBLEM NAUKOWY, CEL, ZAKRES PRACY, TEZY ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

### **2.1 Problemem naukowy**

Problemem naukowym niniejszej pracy jest identyfikacja modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożaru. Elewacje wentylowane są rozwiązaniem technicznym elewacji, które w ostatnich latach zyskuje coraz większą popularność, szczególnie w zastosowaniu okładzin z płyt włóknisto-cementowych. Wraz z rozwojem popularności elewacji wentylowanej wzrasta również świadomość dotycząca problematyki zachowania się tego rodzaju elewacji w warunkach pożaru.

Do rozwiązania problemu naukowego wykorzystano badania na modelach wielkoskalowych – modelach rzeczywistych elewacji w teście skali naturalnej i na elewacji budynku modelowego, który został wzniesiony specjalnie na potrzeby wykonania badań. Do analizy struktury płyt włóknisto-cementowych wykorzystano określenie ich parametrów wytrzymałościowych, analizę wizualną, analizę struktury i powierzchni. Określono również strefę krytyczną dla płyt włóknisto-cementowych wyznaczającą istotną oraz krytyczną ich destrukcję.

### **2.2 Cel pracy**

Cele niniejszej pracy zostały wskazane poniżej:

1. Opis przebiegu badania na modelach wielkoskalowych i ocena elewacji wentylowanej w zakresie odpadania elementów okładzin zewnętrznych oraz destrukcji pozostałych elementów kompletnego systemu elewacji wentylowanej pod wpływem oddziaływania pożaru.
2. Opracowanie lokalnych map rozkładu temperatur dla grupy badań na modelach wielkoskalowych, modelach rzeczywistych i elewacji w budynku modelowym w zakresie oddziaływania pożarem.
3. Opracowanie globalnych map rozkładu temperatur dla badań na modelach rzeczywistych w zakresie oddziaływania pożarem.
4. Porównanie badań na modelach rzeczywistych elewacji z badaniami na elewacjach w budynku modelowym w zakresie oddziaływania pożarem.
5. Opis zniszczenia płyt włóknisto-cementowych w zakresie fazy matrycy cementowej i fazy rozproszonej w oddziaływaniu pożarem na modelach wielkoskalowych.
6. Opracowanie globalnych map destrukcji elewacji dla badań na modelach rzeczywistych w zakresie oddziaływania pożarem.

7. Określenie krytycznej strefy dla okładzin elewacyjnych na podstawie matrycy temperatur wskazującej istotną oraz krytyczną destrukcję.
8. Identyfikacja modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożarem.
9. Identyfikacja globalnego problemu odpadania elementów okładzin elewacyjnych w warunkach oddziaływania pożarem.

## 2.3 Zakres pracy

Zakres, jaki obejmuje niniejsza rozprawa, związany jest z celem pracy i można go przedstawić w poniższych punktach:

1. Dokonanie krytycznego przeglądu literaturowego w zakresie: podstawowych informacji o płytach włóknisto-cementowych; wymagań formalnych stawianych płytom włóknisto-cementowym i elewacjom wentylowanym w zakresie bezpieczeństwa przeciwpożarowego; elewacji wentylowanej względem bezpieczeństwa pożarowego; sposobów oceny elewacji wentylowanej w oddziaływaniach pożarem; problemu odpadania elementów okładzin w elewacjach wentylowanej; sposobu destrukcji płyt włóknisto-cementowych.
2. Przeprowadzenie badań elewacji wentylowanej w zakresie oddziaływania pożarem na modelach rzeczywistych z różnymi okładzinami elewacyjnymi.
3. Przeprowadzenie badań elewacji wentylowanej w zakresie oddziaływania pożarem na elewacjach w budynku modelowym.
4. Opis przebiegu badania na modelach wielkoskalowych i ocena elewacji wentylowanej w zakresie odpadania elementów okładzin zewnętrznych oraz destrukcji pozostałych elementów kompletnego systemu elewacji wentylowanej pod wpływem oddziaływania pożarem w badaniach na modelach wielkoskalowych, modelach rzeczywistych i elewacjach w budynku modelowym.
5. Opracowanie lokalnych map rozkładu temperatur dla grupy badań na modelach wielkoskalowych, modelach rzeczywistych i elewacji w budynku modelowym w zakresie oddziaływania pożarem.
6. Opracowanie globalnych map rozkładu temperatur dla badań na modelach rzeczywistych w zakresie oddziaływania pożarem na elewacji wentylowanej.
7. Porównanie badań na modelach rzeczywistych z badaniami na elewacjach w budynkach modelowych w zakresie oddziaływania pożarem.
8. Przygotowanie próbek referencyjnych w zakresie materiału kompozytowego – płyt włóknisto-cementowych do dalszych badań.



9. Pozyskanie poddanych oddziaływanie pożarem próbek z modeli wielkoskalowych w zakresie materiału kompozytowego – płyt włóknisto-cementowych do dalszych badań.
10. Przeprowadzenie badań, w tym wytrzymałościowych i optycznych, na próbkach płyt włóknisto-cementowych.
11. Opis zniszczenia płyt włóknisto-cementowych w zakresie fazy matrycy cementowej i fazy rozproszonej w oddziaływaniu pożarem na modelach wielkoskalowych.
12. Opracowanie globalnych map destrukcji elewacji wentylowanej z okładzinami z płyt włóknisto-cementowych dla badań na modelach rzeczywistych wraz z określeniem krytycznej strefy na podstawie matrycy temperatur wskazującej istotną oraz krytyczną destrukcję w zakresie oddziaływania pożarem.
13. Identyfikacja stopnia destrukcji i modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożarem.
14. Identyfikacja globalnej problematyki odpadania elementów okładzin elewacyjnych w warunkach oddziaływania pożarem.
15. Opracowanie wniosków końcowych.
16. Podanie kierunków dalszych badań.

## **2.4 Tezy rozprawy doktorskiej**

W rozprawie doktorskiej sformułowano następujące tezy:

1. Identyfikacja modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych jest możliwa na podstawie badań na modelach wielkoskalowych.
2. Obecnie na rynku materiałów budowlanych nie są dostępne płyty włóknisto-cementowe, które spełnią wymagania „nieodpadania elementów okładzin w warunkach pożaru” w rozumieniu par. 225 warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.

## **2.5 Oryginalne elementy pracy**

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć naukowych autora niniejszej pracy, wypełniających braki w literaturze przedmiotu, należy zaliczyć:

- Opracowanie lokalnych map rozkładu temperatur dla grupy badań na modelach wielkoskalowych, modelach rzeczywistych i elewacji w budynku modelowym w zakresie oddziaływania pożarem.
- Opracowanie globalnych map rozkładu temperatur dla badań na modelach rzeczywistych w zakresie oddziaływania pożarem.
- Porównanie badań na modelach rzeczywistych z badaniami na elewacjach w budynkach modelowych w zakresie oddziaływania pożarem.
- Opracowanie globalnych map destrukcji elewacji wentylowanej z okładzinami z płyt włóknisto-cementowych dla badań na modelach rzeczywistych wraz z określeniem krytycznej strefy na podstawie matrycy temperatur wskazującej istotną oraz krytyczną destrukcję w zakresie oddziaływania pożarem.
- Identyfikacja stopnia destrukcji i modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożarem.
- Identyfikacja globalnej problematyki odpadania elementów okładzin elewacyjnych w warunkach oddziaływania pożarem.

### 3. ANALIZA LITERATURY PRZEDMIOTU

#### 3.1 Wymagania formalne stawiane plytom włóknisto-cementowym i elewacji wentylowanej w zakresie pożarowym

Kompletne systemy elewacji wentylowanej i poszczególne elementy całego systemu, takie jak podkonstrukcja czy okładziny zewnętrzne, tak jak przedstawiono wcześniej muszą spełniać szereg wymagań stawianych przez normy i przepisy. W ostatnich latach Unia Europejska rozpoczęła prace w zakresie normalizacji i wytycznych stawianych w zakresie stosowanych materiałów i rozwiązań technicznych dla różnych zestawów wyrobów budowlanych. Prace normalizacyjne Unii Europejskiej dotyczą również kompletnego systemu elewacji wentylowanej, który to został określony przez dokumenty EAD 090062-00-0404 [39] i ETAG 034-1 [40]. Dokument [39] stawia dla kompletnego systemu elewacji wentylowanej wymagania z zakresu:

- a) odporności mechanicznej i stabilności;
- b) bezpieczeństwa w przypadku pożaru, w tym:
  - reakcji na ogień – poszczególne elementy kompletnego systemu elewacji wentylowanej muszą być zgodne z przepisami i wymaganiami stawianymi poszczególnym elementom; klasyfikacja ta opiera się o klasę reakcji na ogień zgodnie z PN-EN 13501-1 [116];
  - odporności na ogień – wymóg odporności ogniowej ma zastosowanie tylko dla samej ściany zewnętrznej (elementu konstrukcyjnego), a nie dla systemu elewacji wentylowanej; kompletny system elewacji wentylowanej wraz z okładzinami zewnętrznymi nie ma stawianych wymagań dotyczących odporności ogniowej przez normę [40];
- c) higieny, zdrowia i środowiska:
  - środowisko wewnętrzne – wilgoć: ochrona przed wilgocią z zewnątrz – ściany zewnętrzne powinny opierać się przenikaniu deszczu i śniegu do wnętrza budynku, również poszczególne elementy elewacji wentylowanej nie mogą być podatne na uszkodzenia przez deszcz i śnieg, ponadto nie mogą umożliwiać przedostawania się wilgoci do żadnej części, w której mogłyby spowodować uszkodzenie; należy również unikać kondensacji na wewnętrznych powierzchniach ściany i kondensacji śródmiaższowej;
  - środowisko zewnętrzne: kompletny system elewacji wentylowanej po zainstalowaniu na ścianie zewnętrznej nie może zanieczyszczać środowiska zewnętrznego (powietrza, gleby lub wody);
- d) bezpieczeństwa użytkowania – kompletne systemy elewacji wentylowanych muszą zapewniać odpowiednią stabilność w połączeniu z generowanymi naprężeniami przez obciążenia stałe (ciężar własny), obciążenia wywołane przez temperaturę, wilgotność, skurcz, ruchy podłoża, a także bezpośrednio uderzenia oraz parcie i ssanie wiatru; jednym z elementów wpływających na bezpieczeństwo użytkowania jest odporność na uderzenia, elementy takie w wyniku uderzeń spowodowanych podczas normalnego ruchu i użytkowania nie mogą spowodować

- roztrzaskania całego elementu; kolejną wymaganą właściwością dla okładzin jest kształt zniszczonego wyrobu podczas pęknięcia – tzn. elementy te nie mogą prezentować ostrych krawędzi; elewacja wentylowana powinna również pozwalać na swobodne przenoszenie poziomych obciążeń punktowych, np. podczas oparcia drabiny celem prac konserwacyjnych;
- e) ochrony przed hałasem – nie są stawiane żadne wymagania dla kompletnych systemów elewacji wentylowanych;
  - f) gospodarki energetycznej i retencji ciepła – nie są stawiane żadne wymagania dla kompletnych systemów elewacji wentylowanych;
  - g) trwałości i łatwości serwisowania – systemy elewacji wentylowanej muszą spełniać wszystkie swoje właściwości przez okres całej gwarancji, szczególnie muszą wykazywać się: trwałością w zakresie zmiany temperatur i zmiany wilgotności, stabilnością w zakresie kolejnych cykliów zamrażania i rozmrażania, odpornością na korozję chemiczną i biologiczną, odpornością na promieniowanie UV, trwałością w zakresie zmiany temperatur dot. niskich temperatur, o temperaturze powietrza rzędu  $-20^{\circ}\text{C}$  (w przypadku krajów Europy Północnej  $-40^{\circ}\text{C}$ ) oraz wysokich rzędu  $+50^{\circ}\text{C}$  (maksymalna temperatura na powierzchni z uwzględnieniem nasłonecznienia wynosi niejednokrotnie  $+80^{\circ}\text{C}$ ), uwzględnieniem zmian temperatury o różnicę  $50^{\circ}\text{C}$  spowodowanych nagłym deszczem przy gorącej, słonecznej pogodzie.

W przypadku aspektu bezpieczeństwa pożarowego EAD 090062-00-0404 [39] reguluje wyłącznie w pewnym zakresie wymagania dla kompletnego systemu elewacji wentylowanej, lecz nie wyklucza on stawiania dodatkowych wymagań, m.in. poprzez normy, standardy lub akty prawne.

W przypadku przepisów obowiązujących na terenie Polski najważniejszym dokumentem przedstawiającym wymagania dla bezpieczeństwa użytkowania budynków jest Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (WT) [132]. Przedstawia ono również ogólne wymagania z zakresu bezpieczeństwa pożarowego dla całych elewacji i ich poszczególnych elementów.

Pierwszym wymaganiem stawianym przez WT [132] jest zapewnienie odpowiedniego ograniczonego stopnia rozprzestrzeniania ognia – dotyczy to większości budynków o odpowiedniej klasie odporności pożarowej budynku. Zapisy dotyczące zapewnienia odpowiedniej klasy odporności ogniowej zawarte są w §216 [132], a dokładniej w §216.1. Elementy budynku, odpowiednio do jego klasy odporności pożarowej, powinny spełniać, z zastrzeżeniem §213 oraz §237 ust. 9, co najmniej wymagania opisane w tabeli 3.1 [132].

**Tabela 3.1.** Klasa odporności ogniowej elementów budynku [132]

Klasa odporności pożarowej budynku	Klasa odporności ogniowej elementów budynku					
	Główna konstrukcja dachu	Konstrukcja dachu	Strop	Ściana zewnętrzna	Ściana wewnętrzna	Przykrycie dachu
I	2	3	4	5	6	7
„A”	R 240	R 30	REI 120	EI 120 (o↔i)	EI 60	E 30
„B”	R 120	R 30	REI 60	EI 60 (o↔i)	EI 30	E 30
„C”	R 60	R 15	REI 60	EI 30 (o↔i)	EI 15	E 15
„D”	R 30	(-)	REI 30	EI 30 (o↔i)	(-)	(-)
„E”	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)

„2. Elementy budynku, o których mowa w ust. 1, powinny być nierozprzestrzeniające ognia, przy czym dopuszcza się zastosowanie słabo rozprzestrzeniających ognie (...)” [132]

WT [132] wskazują nam jakie budynki lub części budynków z uwagi kategorii zagrożenia ludzi, jakie wymagania dla elewacji muszą spełniać. Kategorie zagrożenia ludzi przedstawiono w tabeli 3.2.

**Tabela 3.2.** Kategorie zagrożenia ludzi [132]

Budynek	ZL I	ZL II	ZL III	ZL IV	ZL V
Niski (N)	„B”	„B”	„C”	„D”	„C”
Średniowysoki (SW)	„B”	„B”	„B”	„C”	„B”
Wysoki (W)	„B”	„B”	„B”	„B”	„B”
Wysokościowy (WW)	„A”	„A”	„A”	„B”	„A”

Zapewnienie odpowiedniej klasy reakcji na ogień dla systemów elewacyjnych, w tym elewacji wentylowanej, oznaczonego jako nierozprzestrzeniający ognia (NRO), zgodnie z tabelami 3.1 i 3.2, dotyczy wszystkich budynków z kategorii średniowysokich (SW), a w przypadku niskich (N) wymagania te nie dotyczą tylko budynków z kategorii ZL IV m.in. budynki mieszkalne.

Klasa NRO dotyczy całych systemów elewacji. Żeby spełnić te wymagania, kompletny system musi przejść badania zgodnie z PN-B-02867 [113]. W przypadku konieczności zastosowania elewacji wentylowanej z klasą reakcji na ogień „niepalne” [132] poszczególne jego elementy tworzące cały system muszą spełniać odpowiednie klasy reakcji na ogień zgodnie z PN-EN 13501-1 [116].

W tabeli 3.3 przedstawiono, które klasy reakcji na ogień są wymagane dla uzyskania klasy NRO przez wyroby.

**Tabela 3.3.** Klasy reakcji wyrobów budowlanych [132]

Wyroby budowlane z wyłączeniem posadzek – w tym wykładzin podłogowych		
Określenie dotyczące palności stosowane w Rozporządzeniu WT		Klasa reakcji na ogień zgodnie z PN-EN 13501
Niepalne		<b>A1;</b>
		<b>A2-s1,d0; A2-s2,d0; A2-s3,d0;</b>
Palne	Niezapalne	<b>A2-s1,d1; A2-s2,d1; A2-s3,d1; A2-s1,d2; A2-s2,d2; A2-s3,d2;</b>
		<b>B-s1,d0; B-s2,d0; B-s3,d0;</b> B-s1,d1; B-s2,d1; B-s3,d1; B-s1,d2; B-s2,d2; B-s3,d2;
	Trudno zapalne	C-s1,d0; C-s2,d0; C-s3,d0; C-s1,d1; C-s2,d1; C-s3,d1; C-s1,d2; C-s2,d2; C-s3,d2;
		D-s1,d0; D-s2,d0; D-s3,d0;
	Łatwo zapalne	D-s2,d0; D-s3,d0; D-s2,d1; D-s2,d1; D-s2,d2; D-s3,d2;
		E-d2; E;
Niekapiące		F
		A1
		A2-s1,d0; A2-s2,d0; A2-s3,d0;
		B-s1,d0; B-s2,d0; B-s3,d0;
		C-s1,d0; C-s2,d0; C-s3,d0;
Samogasnące		D-s1,d0; D-s2,d0; D-s3,d0;
Intensywnie dymiące		Co najmniej E
		C-s3,d0; C-s3,d1; C-s3,d2;
		D-s3,d0; D-s3,d1; D-s3,d2;
		E-D2; E
		F
<b>*Pogrubieniem zaznaczono klasy spełniające wymagania klasy NRO – w przypadku zastosowań wewnętrznych.</b>		

Kolejnym wymogiem stawianym przez Rozporządzenie WT [132] jest zapewnienie uniemożliwienia odpadania elementów okładzin elewacyjnych. Wszystkie informacje dotyczące tego parametru są przedstawione w §225 WT [132]: „§225. Elementy okładzin elewacyjnych powinny być mocowane do konstrukcji budynku w sposób uniemożliwiający ich odpadanie w przypadku pożaru

w czasie krótszym niż wynikający z wymaganej klasy odporności ogniowej dla ściany zewnętrznej, określonej w §216 ust. 1, odpowiednio do klasy odporności pożarowej budynku, w którym są one zamocowane”.

Analogicznie do wyznaczenia odpowiednich wymagań klasy rozprzestrzeniania się ognia wyznacza się czas, jaki powinna spełnić elewacja, żeby nie nastąpiło odpadanie z niej części elementów okładzin podczas pożaru. Niestety, spełnienie takich parametrów wielokrotnie jest trudne, bądź nawet niemożliwie do uzyskania. Instytut Techniki Budowlanej (ITB) zauważył to, a następnie zadał pytanie Komendzie Głównej Straży Pożarnej z prośbą o interpretację tychże przepisów. Komenda Główna Straży Pożarnej w 2013 r. [111] wydała interpretację wymagań, dopuszczając odpadanie elementów pod względem spełnienia odpowiednio określonych kryteriów. Przy ocenie spadających fragmentów okładzin elewacyjnych należy brać pod uwagę jako kryteria oceny ich energię. Spadające elementy należy uznać za niebezpieczne dla ewakuujących się ludzi o wielkość i energii takiej, które powodują obrażenia kwalifikowane jako niebezpieczne dla zdrowia. Kwalifikacji tej dokonuje jednostka certyfikująca Instytut Techniki Budowlanej, która to dla budynków wysokich przyjęła jako maksymalne odpadające elementy o masie 5 kg. Dla wysokościowych kwalifikacja ustalana jest indywidualnie.

### **3.1.1 Wymagania formalne dla okładzin elewacji wentylowanej**

Rozporządzenia i przepisy prawne obowiązujące na terenie Polski w większości stawiają wymagania w zakresie ogólnym dla kompletnych elementów budynku tj. ściany, przegrody, stropy oraz elewacja. W przypadku poszczególnych elementów całego systemu wymagania w zakresie parametrów stawiają normy branżowe. Normy te również przedstawiają rodzaj badania, którym należy poddać taki wyrobu budowlany oraz opisują, jak zinterpretować ich wynik. W przypadku najważniejszej oceny w zakresie przeciwpożarowym, czyli klasy reakcji na ogień poszczególnych elementów, klasyfikacji dokonuje się według normy PN EN 13501-1 [116]. Jest ona wielokrotnie przywoływana przez rozporządzenie WT [132]. Klasa reakcji na ogień definiowana jest przez udział wyrobu poprzez swój własny rozkład w oddziaływaniu ogniowym, który jest poddany w określonych warunkach. Oznacza się go od najmniejszego udziału ogniowego do największego, kolejno: A1, A2, B, C, D, E. W przypadku kompletnego systemu elewacji wentylowanej klasa reakcji na ogień dotyczy wszystkich poszczególnych elementów tj. konsole, podkonstrukcje, okładziny zewnętrzne itp. Szczególną uwagę przy projektowaniu i wykonywaniu elewacji wentylowanej należy zwrócić na okładzinę zewnętrzną, która może być wykonana z materiałów kompozytowych, a w przypadku stawiania szczególnych wymagań z zakresu bezpieczeństwa przeciwpożarowego takie materiały mogą ich nie spełniać. Wymagania oraz sposób badania w odniesieniu do uzyskania odpowiedniej klasy reakcji na ogień oraz w odniesieniu do norm przedstawiono w tabeli 3.4 [116].

**Tabela 3.4.** Klasy reakcji na ogień dla wyrobów budowlanych w oparciu o metody badania i kryteria klasyfikacji [116]

Klasa	Metoda badania	Kryteria klasyfikacji	Kryteria dodatkowe
A1	PN-EN ISO 1182 i	$\Delta T \leq 30^{\circ}\text{C}$ ; i $\Delta m \leq 50\%$ ; i $t_f = 0$ (tzn. brak zapalenia ustalonego)	-
	PN-EN ISO 1716	$\text{PCS} \leq 2,0 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (1); i $\text{PCS} \leq 2,0 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (2) (2a); i $\text{PCS} \leq 1,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (3); i $\text{PCS} \leq 2,0 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (4)	-
A2	PN-EN ISO 1182 lub	$\Delta T \leq 50^{\circ}\text{C}$ ; i $\Delta m \leq 50\%$ ; i $t_f \leq 20 \text{ s}$	-
	PN-EN ISO 1716 i	$\text{PCS} \leq 3,0 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (1); i $\text{PCS} \leq 4,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (2); i $\text{PCS} \leq 4,0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (3); i $\text{PCS} \leq 3,0 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (4)	-
	PN-EN 13823	$\text{FIGRA} \leq 120 \text{ W}\cdot\text{s}^{-1}$ ; i $\text{LFS} < \text{krawędź próbki}$ ; i $\text{THR}_{600\text{s}} \leq 7,5 \text{ MJ}$	Wydzielanie dymu i Spadające krople/cząstki
B	PN-EN 13823 i	$\text{FIGRA} \leq 120 \text{ W}\cdot\text{s}^{-1}$ ; i $\text{LFS} < \text{krawędź próbki}$ ; i $\text{THR}_{600\text{s}} \leq 7,5 \text{ MJ}$	Wydzielanie dymu i Spadające krople/cząstki
	PN-EN ISO 11925-2 Ekspozycja = 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ w czasie 60 s	
C	PN-EN 13823 i	$\text{FIGRA} \leq 250 \text{ W}\cdot\text{s}^{-1}$ ; i $\text{LFS} < \text{krawędź próbki}$ ; i $\text{THR}_{600\text{s}} \leq 15 \text{ MJ}$	Wydzielanie dymu i Spadające krople/cząstki
	PN-EN ISO 11925-2 Ekspozycja = 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ w czasie 60 s	
D	PN-EN 13823 i	$\text{FIGRA} \leq 750 \text{ W}\cdot\text{s}^{-1}$ ; i $\text{LFS} < \text{krawędź próbki}$ ; i	Wydzielanie dymu i Spadające krople/cząstki
	PN-EN ISO 11925-2 Ekspozycja = 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ w czasie 60 s	
E	PN-EN ISO 11925-2 Ekspozycja = 15 s	$F_s \leq 150 \text{ mm}$ w czasie 20 s	Spadające krople/cząstki
F	Właściwość nie określona		



Klasa reakcji na ogień A1 oraz A2 zgodnie z tabelą 3.4 oraz nazewnictwem przedstawionym w PN-EN 13501-1 [x16] to materiały niepalne lub niezapalne, niedająca minimalnej ilości lub dające minimalną ilość wkładu w oddziaływaniu ogniowym.

Ocenę wyrobów budowlanych o klasie reakcji na ogień A1 i A2 wykonuje się m.in. zgodnie z normą PN EN ISO 1182 [122]. Badania te wykonywane są na stanowisku badawczym, które składa się z pieca z ogniotrwałą rurą z nawiniętą spiralą grzejącą i izolacją, jest on nazywany również piecem rurowym. Badanie odbywa się poprzez umieszczenie próbki badanego wyrobu na specjalnie do tego przygotowanym urządzeniu wprowadzającym. Próbki materiałów powinny być odpowiednio przygotowane, tzn. powinny mieć kształt walca o objętości  $(76 \pm 8) \text{ cm}^3$ , średnicy  $(4 \pm 0.2) \text{ mm}$  i wysokości  $(50 \pm 3) \text{ mm}$ . Przykładowy piec rurowy przedstawiono na rysunku 3.1 [75].



**Rys. 3.1.** Przykładowy piec rurowy [75]

Norma PN EN ISO 1182 [122] przedstawia szereg wymagań dla przygotowania próbek, m.in. sezonowanie ich zgodnie z EN 13238 [115]. Badanie to [122] powinno odbyć się na próbie przynajmniej 5 próbek, w stałej temperaturze zewnętrznej, w pomieszczeniu nienarażonym na przeciągi. Badanie może rozpocząć się w temperaturze wewnętrznej w piecu, gdy temperatura przedstawiana na termoparach jest ustabilizowana  $(750 \pm 5)^\circ\text{C}$  przez co najmniej 10 min. Czas trwania badania to 30 lub 60 min, gdzie przed przystąpieniem do badania należy określić wagę próbki oraz porównać ją z masą po badaniu. Kolejne aspekty badania to wizualne określenie zachowania się próbki podczas badania. Termopary umieszczone wewnątrz badają przebieg temperatury, na końcu należy dokonać weryfikacji tego, czy zanotowały one jakiegokolwiek wzrosty temperatury. Z badania wykonuje się protokół,

wszystkie zebrane informacje służą do określenia klasy reakcji na ogień wyrobu w zakresie obowiązywania normy [122].

Kolejną normą, na podstawie której dokonuje się oceny wyrobu budowlanego w zakresie reakcji na ogień, jest norma PN-EN ISO 1716 [124]. Na jej podstawie możliwe jest określenie ciepła spalania brutto, poprzez które rozumie się energię cieplną wydzieloną w wyniku spalania jednostki masy danej substancji wyrażonej w megadżulach na kilogram. Ciepło spalania brutto substancji definiuje się jako całkowite spalanie w określonych warunkach przy efekcie całkowicie skroplonej wody, która została wytworzona.

Badanie to wykonuje się w aparaturze – bombie kalorymetrycznej wytrzymującej ciśnienie wewnętrzne 21 MPa. Przykładową bombę kalorymetryczną przedstawiono na rysunku 3.2 [124].



**Rys. 3.2.** Bomba kalorymetryczna wg PN-EN ISO 1716 [124]

Badanie poprzedzone jest procedurą kalibracji, która m.in. wymaga uruchomienia całej aparatury co najmniej 1h przed badaniem. Kolejno odbywa się nastawienie przyrządów do pomiaru temperatury i czasu oraz zrównanie temperatury wody w naczyniu kalorymetrycznym oraz w płaszczu wodnym do równej. Kolejnym krokiem jest wyciągnięcie bomby z kalorymetru i pozostawienie jej na 10 minut, sukcesywne zmniejszanie ciśnienia aż do otwarcia oraz oceny spalania wewnątrz bomby. Metodę tę stosuje się dla wyrobów budowlanych o klasie reakcji na ogień A1 i A2.

Określenia klasy reakcji na ogień: A2, B, C, D wykonuje się w oparciu o normę PN-EN 13823:2010 [118]. Badanie polega na obserwacji rozwoju ognia w specjalnie przygotowanym do tego pomieszczeniu badawczym oraz na platformie badawczej, na której zamontowane są próbki. Badane próbki przymocowane są do ścianek prostopadłych zintegrowanych z wózkiem, który wjeżdża

do specjalnie przygotowanego pomieszczenia. Na rysunku 3.3. przedstawiono pomieszczenie wraz z platformą [118].



**Rys. 3.3.** Pomieszczenie oraz platforma badawcza do badania klasy reakcji na ogień wg PN-EN 13823:2010 [118]

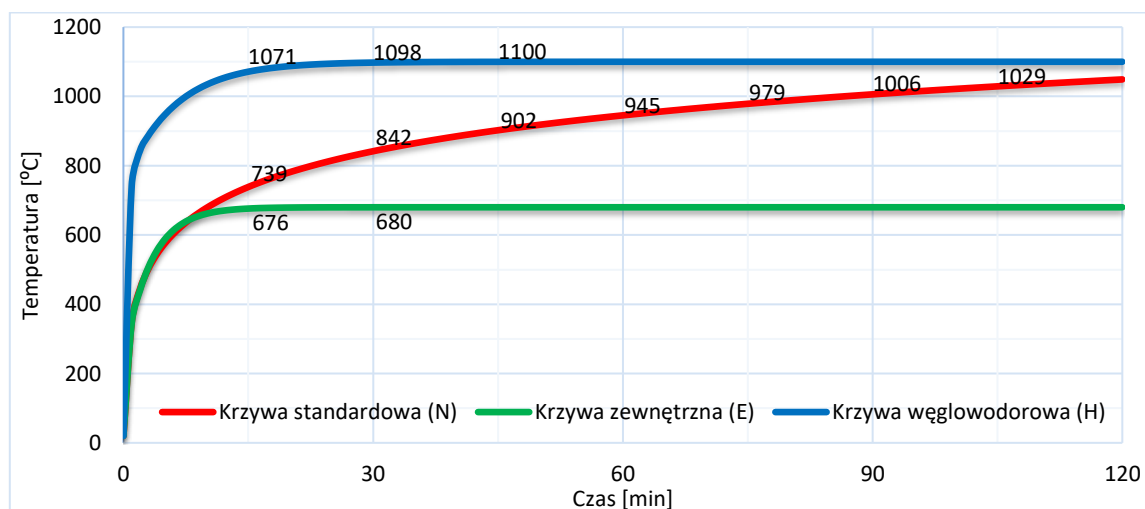
Próbki mocowane prostopadle do siebie mają wymiary: dla krótkiego skrzydła –  $495 \times 1500$  mm, dla długiego skrzydła –  $1000 \times 1500$  mm, a maksymalna ich grubość to 200 mm. Próbka musi być połączona przy prostopadłych skrzydełkach, żeby stanowiła jedną całość. Palnik umieszczony jest w pobliżu próbki. Palnik oddziałuje na nie płomieniem uzyskiwanym poprzez spalanie propanu i przechodzenie przez pojemnik z piaskiem o mocy  $30,7 \pm 2,0$  kW. Badanie trwa około 30 minut i w sytuacji występowania płonących kropli lub cząstek rejestruje się je tylko w przypadku pierwszych 300 s. Badanie pozwala również na wykonanie pomiaru stężenia gazu, wydzielania ciepła oraz obserwacji występowania płonących kropli.

Ostatnim badaniem uznawanym przez normę klasyfikacyjną PN EN 13501-1 [116] do oceny klasy reakcji na ogień wyrobów budowlanych jest norma EN ISO 11925-2 [123]. Według niej badaniu poddaje się próbki wyrobów o najmniejszych gabarytach, tzn.:  $250 \times 90$  mm. Badanie odbywa się w tzw. komorze spalania, w której źródłem paliwa jest propan. Przykładową komorę spalania przedstawiono na rysunku 3.4 [123]. W skład aparatu wchodzi m.in.: obudowa komory, palnik zasilany propanem, uchwyt do zamocowania i wieszania próbki, szablon, wzornik płomienia, wiatromierz i stoper.



**Rys. 3.4.** Komora spalania wg EN ISO 11925-2 [123]

Co do określenia parametrów nośności, szczelności oraz izolacyjności w zakresie przeciwpożarowym sposób ich wyznaczania i oceny przedstawia norma PN-EN 1363:1: Badania odporności ogniowej. Część 1. Wymagania ogólne. [117]. Są to parametry do oceny zdolności elementów do wytrzymania oddziaływania wysokiej temperatury w określonym zakresie poprzez ustalenie kryteriów nośności ogniowej, zdolności do powstrzymania ognia (szczelności ogniowej) i przepływu ciepła (izolacyjności ogniowej). Reprezentatywna próbka wyrobu zostaje poddana określonym w Normie warunkom nagrzewania, a zachowanie elementu próbnego jest monitorowane na podstawie kryteriów opisanych w charakteryzowanej normie. Odporność ogniowa elementu próbnego wyrażana jest czasem, przez który są spełnione odpowiednie kryteria oceny. Uzyskane w ten sposób czasy są miarą odpowiedności konstrukcji w warunkach ogniowych, lecz nie mają bezpośredniego związku z czasem trwania rzeczywistego pożaru. Stoisko, na którym odbywa się badanie, wyposażone jest w termopary, które służą do kontroli temperatury i jej przebiegu zgodnie z krzywą standardową. Przebieg krzywej standardowej, krzywej zewnętrznej oraz krzywej węglowodorowej przedstawiono na rysunku 3.5.



**Rys. 3.5.** Krzywa standardowa przebiegu temperatury pożaru wg PN-EN 1363:1: Badania odporności ogniowej. Część 1. Wymagania ogólne [117]

Termopary wewnątrz aparatury badawczej kontrolują temperaturę w stanie rzeczywistym, dopuszczając maksymalne odchylenie temperatury w piecu o 15 K. Badania rozpoczynają się od sprawdzenia temperatury początkowej zarejestrowanej przez wszystkie termoelementy w celu zapewnienia zgodności oraz ustalenia wartości wyjściowej. Jeśli weryfikuje się również inne parametry, należy ustalić inne wartości wyjściowe tj. ugięcie początkowe elementu próbnego. Początkowa średnia temperatura termoelementów wewnętrznych oraz temperatura powierzchni nienagrzewanej elementu próbnego powinny mieścić się w zakresie od 10°C do 40°C i nie powinny się różnić od początkowej temperatury otoczenia więcej niż o 5°C. Przed rozpoczęciem badania temperatura w piecu powinna być niższa niż 50°C, a rozpoczęcie badania odbywa się w momencie uruchomienia programu krzywej nagrzewania (uruchomienia palników). Od tego momentu należy mierzyć czas, wszystkie ręczne i automatyczne systemy do pomiarów i obserwacji powinny rozpocząć działanie, piec powinien być tak sterowany, żeby zapewnić odpowiednie warunki temperaturowe.

### **3.1.2 Badania globalne kompletnych systemów elewacji**

Wymagania stawiane w §225 WT [132] dotyczące uniemożliwienia odpadania części okładzin elewacyjnych podczas sytuacji wyjątkowej, jaką jest oddziaływanie pożarem w przypadku elewacji wbudowywanych na terenie Polski, weryfikuje się m.in. za pomocą tzw. modeli rzeczywistych. Podobne wymagania ograniczające odpadanie elementów okładzin z elewacji w sytuacji oddziaływania pożaru są również wymagane w większości krajów w Europie i na świecie. Wymagania w Polsce, z uwzględnieniem interpretacji przepisów przez KGSP [111], stanowią mniej więcej wyśrodkowanie wymagań w Europie. Najbardziej restrykcyjne wymagania dotyczące uniemożliwienia odpadania części elementów elewacji podczas pożaru są m.in. w: Szwajcarii, Niemczech, Danii, Norwegii, Szwecji, Lichtensteinie i Grecji. W tych krajach nie dopuszcza się odpadania żadnych części elementów z elewacji podczas pożaru. Najbardziej liberalnym podejściem cechują się Węgry i Austria, dopuszczając spadające elementy z elewacji spowodowane pożarem o wadze nawet 5 kg. Zgoła inne podejście można zaobserwować w Wielkiej Brytanii i Irlandii, gdzie wszystkie wymagania są definiowane indywidualnie przez jednostkę certyfikującą w zależności od typu elewacji, sposobu jej montażu, rodzaju okładziny zewnętrznej itd. Polskie wymagania, a dokładniej warunek kryterium energii dotyczący uniemożliwienia odpadania elementów podczas pożarów, jest problematyczny w ocenie. Kryterium energii nie jest jasno przedstawione, co może powodować wątpliwości. Wymagania przykładowych krajów dotyczące odpadania elementów w warunkach pożaru przedstawiono w tabeli 3.5 [19].

**Tabela 3.5.** Wymagania dotyczące uniemożliwienia odpadania elementów elewacji w warunkach pożaru w przykładowych krajach Europy [19]

Kraj	Wymagania	Norma/Standard
Austria	Spadające elementy nie mogą być większe niż 5 kg lub 0,4 m <sup>2</sup> .	ÖNORM B 3800-5
Dania, Norwegia, Szwecja	Nie może być żadnych dużych elementów spadających z elewacji	SP Fire 105
Finlandia	Spadające elementy nie mogą być większe 0,1 m <sup>2</sup>	Engineering guidance 16
Niemcy	Nie mogą występować żadne spadające elementy (płonące i niepłonące).	DIN 4102-20
Wielka Brytania, Irlandia	Odpryskiwanie, rozwarstwienie lub płonące elementy są rejestrowane i oceniane jest indywidualne ryzyko przy określaniu wymagań dla całego systemu elewacyjnego.	BS 8414 series
Grecja	Nie mogą występować żadne spadające elementy (płonące i niepłonące).	SBI reaction-to-fire test
Węgry	Spadające elementy nie mogą być większe niż 5 kg.	MSZ 14800-6
Polska	Nie mogą występować żadne spadające elementy (płonące i niepłonące). *	PN-B-02867
Szwajcaria, Lichtenstein	Nie mogą występować żadne spadające elementy (płonące i niepłonące).	DIN 4102-20 / ÖNORM B 3800-5
Szwecja	Spadające elementy nie mogą być większe niż 1,5 kg (1,0 kg jeżeli element ostry) lub 0,06 m <sup>2</sup> .	Nieoficjalne wytyczne

\* Interpretacja przepisów przez Komendę Główną Straży Pożarnej dopuszcza odpadanie elementów z kryterium energii [111]

Modele rzeczywiste elewacji w skali naturalnej są rodzajem platformy badawczej całego systemu elewacyjnego, na który oddziałuje kontrolowany pożar. Podczas wykonywania badania na

platformie możliwa jest weryfikacja w zakresie rozprzestrzeniania się pożaru, palności materiałów, odpadania elementów elewacji itd. Na całym świecie jest wiele norm i procedur opisujących różne modele rzeczywiste elewacji oraz sposoby badania oddziaływania pożarem na elewacje. Modele te cechują się odpowiednio dużymi gabarytami odwzorowującymi część elewacji. Rozróżnia się dwie klasy modeli w zależności od skali: skala średnia i skala duża. W przypadku skali średniej wymiary badanego modelu wynoszą minimalnie  $3,0 \times 3,0$  m, a w przypadku skali dużej wymiary minimalne to  $3,0 \times 6,0$  m, symulując co najmniej 2 kondygnacje powyżej źródła ognia. W przypadku badania w dużej skali istnieje możliwość analizy rozprzestrzeniania się ognia pomiędzy kolejnymi kondygnacjami. Poszczególne normy i procedury w krajach Europy różnią się nie tylko wymiarami badanej platformy, lecz również innymi elementami. Niektóre z nich, poza sposobem wykonania badania, podają również kryteria oceny elewacji, które zestawiono w tabeli 3.6. Przykładowy kształt modeli rzeczywistych elewacji w skali naturalnej w dwóch wariantach (skali dużej i skali średniej) przedstawiono na rysunku 3.6.





**Rys. 3.6.** Badanie w zakresie oddziaływania pożarem modeli rzeczywistych elewacji: a) w teście dużej skali [64]; b) w teście średniej skali

Źródło: Materiały własne

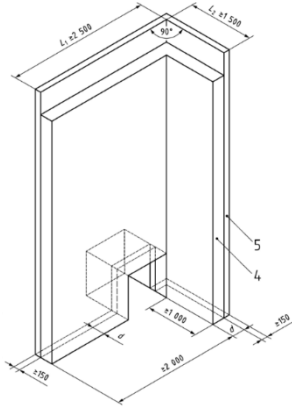


W przypadku Polski badania w zakresie globalnego oddziaływania pożarem na elewacje wykonuje akredytowana jednostka certyfikująca – Instytut Techniki Budowlanej. Instytut Techniki Budowlanej posiada własną procedurę na wykonywanie badań modeli rzeczywistych, ponadto w Polsce


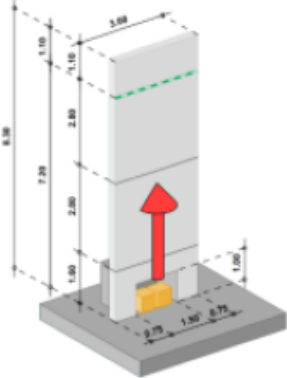

jest również dostępna polska norma PN-B – 02867:2013-6: Ochrona przeciwpożarowa budynków. Metoda badania stopnia rozprzestrzeniania ognia przez ściany zewnętrzne od strony zewnętrznej oraz zasady klasyfikacji [113] przedstawia standard wykonywania badań na modelach rzeczywistych w teście skali naturalnej w oddziaływaniu pożarem. Zarówno w całej Europie, jak i na świecie istnieje wiele norm i procedur badania oddziaływaniem pożarem na elewacje. Standardy te zazwyczaj obowiązują tylko na terenie jednego, maksymalnie kilku krajów i umożliwiają wbudowanie badanego systemu tylko w krajach, gdzie ta procedura obowiązuje. Główne założenia wszystkich procedur i norm w zakresie badania elewacji są ze sobą zbieżne. W tabeli 3.6. przedstawiono zestawienie najpopularniejszych norm i procedur do badania elewacji podczas oddziaływania pożarem obowiązujących na terenie Europy. Dodatkowo zamieszczono tam opisy, ich dokładniejsze zastosowanie oraz przykładowe fotografie stanowiska badawczego.

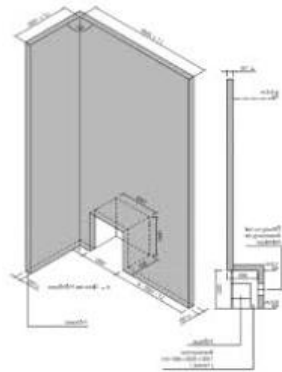


**Tabela 3.6.** Zestawienie procedur i norm do badania elewacji [19]



Kraj	Norma	Opis	Zastosowanie	Skala	Konfiguracja (rysunki)
Polska	PN-B-02867	Celem jest określenie zachowania się pożaru na elewacji bez otworów. Założeniami badania jest oddziaływanie ciepłem i płomieniami oraz weryfikacja wpływu tych elementów na elewację. Źródłem ognia są beleczki drewniane.	Wszystkie systemy elewacji w zakresie określenia odpadania elementów.	Średnia skala	
Polska (ITB)	Procedura PB LP-091/1/11-2014	Metoda badania i oceny ścian zewnętrznych budynków w zakresie odpadania elementów elewacji w przypadku pożaru. Założeniami badania jest oddziaływanie ciepłem i płomieniami oraz weryfikacja wpływu tych elementów na elewację. Źródłem ognia jest uwalniający się gaz.	Wszystkie systemy elewacji w zakresie określenia odpadania elementów.	Średnia skala	



Kraj	Norma	Opis	Zastosowanie	Skala	Konfiguracja (rysunki)
Niemcy Szwajcaria	DIN 4102- 20	Polega ona na weryfikacji całego systemu elewacji w zakresie rozwoju pożaru i odpadania elementów.	Wszystkie systemy elewacji.	Średnia skala	
Wielka Brytania, Irlandia	BS 8414 Series	Część 1 – Odporność ogniowa dla zewnętrznych systemów okładzin. systemów okładzinowych. Metoda badania dla systemów okładzin zewnętrznych mocowanych na ścianie murowanej.  Część 2 - Odporność ogniowa dla zewnętrznych systemów okładzin. Metoda badania dla systemów okładzin zewnętrznych mocowanych na ścianie o konstrukcji stalowej.	Wszystkie systemy elewacji w zakresie określenia odpadania elementów.	Duża skala (skala naturalna)	
Szwecja, Norwegia, Dania	SP FIRE 105	Procedura określania reakcji na ogień materiałów i konstrukcji zewnętrznych systemów elewacyjnych, lub okładzin elewacyjnych. Pożar symulowany jest przez płomień wydostające się z okna.	Metoda ma zastosowanie do: -systemów elewacyjnych, -okładzin elewacyjnych adaptowanych do istniejących ścian zewnętrznych. Metoda nie ma zastosowania do wyznaczania wytrzymałości systemów elewacyjnych lub okładzin elewacyjnych przy ekspozycji na ogień (a jedynie do badania rozprzestrzeniania).	Średnia skala	

Kraj	Norma	Opis	Zastosowanie	Skala	Konfiguracja (rysunki)
Węgry	MSZ 14800-6	Metoda badania i oceny ścian zewnętrznych budynków w zakresie odpadania elementów elewacji w przypadku pożaru. Nie ma przepisów do zastosowania tej normy (jest nieobligatoryjna).	Wszystkie systemy elewacji w zakresie określenia odpadania elementów.	Duża skala (skala naturalna)	
Szwajcaria	Prüfbestimmung für Aussenwandbekleidungs-systeme	Procedurę stosuje się do badania i oceny zachowania się elewacji podczas pożaru rozwijającego się po stronie zewnętrznej. Pożar symulowany jest z otworu (mieszkania).	Przeznaczona do oceny powierzchni na elewacji (farb, powłok).	Duża skala	
Francja	LEPIR 2	Metoda badania i oceny ścian zewnętrznych budynków w zakresie oddziaływania pożarem. Podaje kryteria klasyfikacji.	Wszystkie systemy elewacji włączając systemy z oknami	Duża skala	

Kraj	Norma	Opis	Zastosowanie	Skala	Konfiguracja (rysunki)
Austria, Szwajcaria	ÖNORM B 3800-5	Ta metoda symuluje pożar z wydobywający się z okna mieszkania. Badaniu może podlegać: zachowanie konstrukcji i materiału, rozprzestrzenianie się ognia po okładzinie zewnętrznej.	Przeznaczona do oceny elewacji: -ETICS, -Wentylowanych, -Ścian osłonowych	Średnia skala	
Czechy/ Słowacja	ISO 13785-1 Reaction-to-fire tests for façades — Part 1: Intermediate-scale test	Stosowanie dla rozwiązań standardowych.	Metoda ma zastosowanie do: -systemów elewacyjnych, -okładzin elewacyjnych adaptowanych do istniejących ścian zewnętrznych, - badania rozprzestrzeniania się ognia.	Średnia skala	
Czechy/ Słowacja	ISO 13785-2 Reaction-to-fire tests for façades — Part 2: Large-scale test	Stosowanie tej normy możliwe jest tylko w przypadku, gdy rozwiązanie standardowe nie są możliwe do wykonania lub są inne ograniczenia.	Metoda nie ma zastosowania do: - wyznaczania wytrzymałości systemów elewacyjnych lub okładzin elewacyjnych Przy ekspozycji na ogień.	Duża skala	

Kraj	Norma	Opis	Zastosowanie	Skala	Konfiguracja (rysunki)
Niemcy	Technical regulation A 2.2.1.5	Bada rozprzestrzeniania się ognia na powierzchni zewnętrznej elewacji ETICS.	Badanie przeznaczone dla systemów elewacji ETICS z izolacją EPS.	Duża skala	
Finlandia	Tekniikka opastaa 16 (Engineering guidance 16)	Badany jest efekt rozprzestrzeniania się ognia na powierzchni ściany i w obrębie jej struktury.	Stosowanie do oceny palnych materiałów izolacyjnych. Stosowana jest również w ocenie elewacji drewnianych.	Duża skala	

Procedury badań i normy przedstawione w tabeli powyżej różnią się nie tylko zakresem zastosowania, lecz także sposobami badania oraz kształtem platformy badawczej. Wymiary platform badawczych dla poszczególnych systemów przedstawiono w tabeli 3.7. Platformy badawcze posiadają również różne rodzaje ścian bocznych i otworów symulujących powyższe kondygnacje.

**Tabela 3.7.** Wymiary platform badawczych dla poszczególnych norm i procedur [19]

Standard	Główna ściana	Ściana boczna	Otwory
BS 8414	2,6 × 8,0 m	1,5 × 6,0 m <sup>2</sup>	-
DIN 4102-20	2,5 × 6,0 m	1,5 × 6,0 m <sup>2</sup>	-
Prüfbestimmung für Aussenwand-bekleidungs-systeme	3,0 × 8,3 m	-	-
Technical regulation A 2.2.1.5	4,25 × 9,8 m	2,25 × 9,8 m <sup>2</sup>	-
PN-B-02867	1,8 × 2,3 m	-	-
LEPIR 2	4,85 × 7,05 m	-	Tak, na 1-szym i 2-gim piętrze
MSZ 14800-6	4,4 × 7,27 m	-	Tak
ÖNORM B 3800-5	3,5 × 6,0 m	2,0×6,0 m <sup>2</sup>	-
SP Fire 105	4,0 × 6,0 m	-	Tak, na 1-szym i 2-gim piętrze
Engineering guidance 16	min. 4,0 × 8,0 m	-	Tak, na 1-szym i 2-gim piętrze
ISO 13785-2	3,0 × 5,7 m	1,2 × 5,7 m <sup>2</sup>	-
ISO 13785-1	1,2 × 2,8 m	0,6 × 2,8 m <sup>2</sup>	-

Kolejnym elementem, który wyróżnia poszczególne normy i procedury badań modeli rzeczywistych elewacji podczas oddziaływania pożarem, jest źródło ognia. Rozróżnia się dwa główne źródła ognia – bazujące na spalaniu gazu oraz bazujące na spalaniu drewnianych belek. Źródła ognia stosowane w różnych normach i procedurach przedstawiono w tabeli 3.8.

**Tabela 3.8.** Źródło ognia dla poszczególnych norm i procedur [19]

Standard	Źródło ognia
DIN 4102-20	palnik gazowy - propan, o szybkości uwalniania $7.4 \pm 5$ % g/s lub belki drewniane o wadze $30 \pm 1.5$ kg
BS 8414 series	belki drewniane o wadze 40 kg
PN-B-02867	belki drewniane o wadze 20 kg
Engineering guidance 16	belki drewniane uwzględniające minimalna moc pożaru 5000 MJ
ISO 13785-1	palnik gazowy - propan o mocy 100 kW
ISO 13785-2	belki drewniane o wadze 400 kg lub palnik gazowy - propan
LEPIR 2	belki drewniane o wadze 600 kg
MSZ 14800-6	belki drewniane o wadze 650 kg
SP Fire 105	palnik gazowy - heptan, 60 litrów
Technical regulation A 2.2.1.5	belki drewniane o wadze 200 kg
ÖNORM B 3800-5	belki drewniane o wadze 25 kg

Jak przedstawiono w tabelach: 3.6, 3.7 i 3.8, w obrębie Europy istnieje bardzo wiele procedur badania i oceny kompletnych systemów elewacyjnych. Niestety, ze względu na inne wytyczne do oceny przejście pomyslnych badań w danym kraju nie upoważnia do zastosowania systemu w innych krajach. Tak więc zastosowanie danego systemu elewacyjnego na terenie innego kraju niż tego, gdzie odbywała się jego ocena, jest w większości przypadków niemożliwe. Jest to bardzo niekorzystne rozwiązanie dla producentów, gdyż pomimo nieraz niewielkich różnic pomiędzy poszczególnymi procedurami i normami producenci muszą wykonywać wiele takich testów w poszczególnych krajach, gdzie chcą sprzedawać swój produkt. Kolejną rozbieżnością jest to, że niektóre procedury i normy do oceny modeli rzeczywistych elewacji podają szereg wymagań odnośnie klasyfikacji, a inne przedstawiają wyłącznie sposób badania.

Unia Europejska, na czele z ekspertami powołanymi przez Komisję Europejską [19], zauważając ten problem, rozpoczęła prace nad utworzeniem jednolitego sposobu badania oraz jednakowego sposobu oceny systemów elewacyjnych. Komisja Europejska w dokumentach [19, 42] zaproponowała nową formułę badania modelu rzeczywistego elewacji w skali naturalnej (w dużej oraz w średniej skali). Pierwowzorem tej propozycji były standardy: DIN 4102-20 oraz BS 8414. Poza tą propozycją zaproponowano również sposób oceny oraz wymagania dotyczące zagrożenia, które powoduje elewacja podczas pożaru (m.in. poprzez odpadanie części okładzin elewacyjnych).

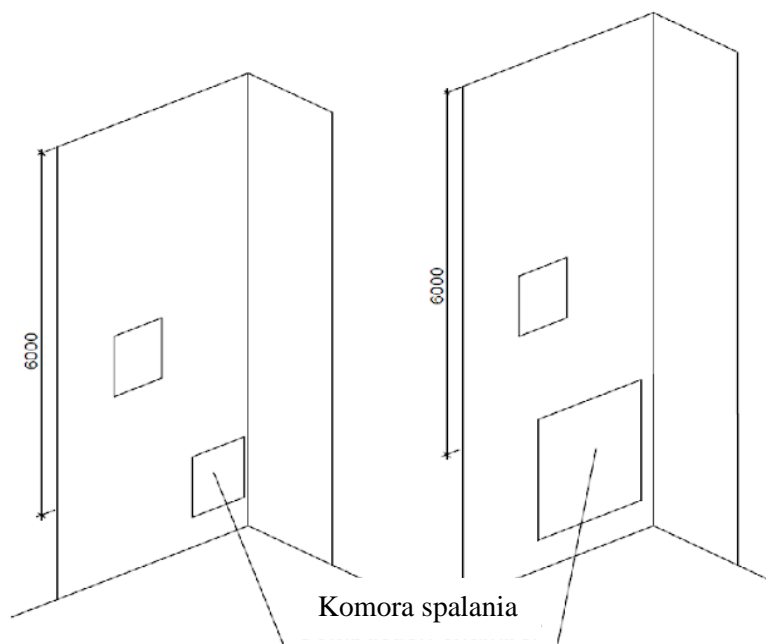
Zaproponowany został system kwalifikacji oparty m.in. o gabaryty odpadający części elementów elewacji podczas pożaru. Monitorowanie ich odbywałby się przy pomocy obserwacji przez cały czas trwania badania. Głównymi założeniami byłoby, iż spadające części nie mogą stanowić zagrożenia dla ewakuacji osób postronnych, pracy personelu ratowniczego oraz pracy straży pożarnej. Ponadto, zaproponowano następującą nową propozycję kryteriów oceny poszczególny elewacji [42], które w zależności o powodowanego zagrożenia i skali odpadania elementów uzyskiwałyby odpowiednią klasę:

- klasa F1 – nie może być spadających części elementów większych aniżeli 1 kg i 0,1 m<sup>2</sup>;
- klasa F2 – nie może być spadających części elementów większych aniżeli 5 kg i 0,4 m<sup>2</sup>;
- klasa D0 – nie mogą spadać żadne płonące cząstki;
- klasa D1 – spadające części elementów nie mogą płonąć więcej niż < 20 s.

Zaproponowano również alternatywną metodę oceny, w której odpadające części elementów są ograniczone do maksymalnie 1 kg i powierzchni 0,1 m<sup>2</sup> dla każdego pojedynczego elementu.

W przypadku alternatywnej metody ograniczeniem dla klasy D1 byłby warunek spadających kapiących kropeł (maksymalnie 10) z danego badanego materiału i ograniczenie maksymalnego czasu spalania jej na ziemi do czasu poniżej 20 s. Płonące spadające materiały nie mogłyby przekraczać średnicy 50 mm. W przypadku kawałków zwęglonego drewna, które spadają i nadal się żarzą, dopuszczalna ich liczba jest taka jak spadających płonących kropeł. Materiały niepalące się po upadku, a mieszczące się w definicji rozmiaru i wagi, zaczynające się palić na ziemi, byłyby akceptowalne. Czas trwania badania wynosiłby 60 minut – w tym czasie dokonywałoby się oceny badanego materiału.

Procedura badawcza Komisji Europejskiej przedstawiona została w dokumencie No 761/PP/GRO/IMA/19/1133/11140: *European approach to assess the fire performance of facades* [42]. Model rzeczywisty opiera się o znane już standardy, jest dostępny w dwóch wariantach – skali średniej i skali dużej. Na rysunku 3.7. przedstawiono dwa warianty możliwej oceny elewacji [42] a) w średniej skali; b) w dużej skali.



**Rys. 3.7.** Modele rzeczywiste do badania elewacji wg procedury: a) średnia skala; b) duża skala [22]

W przypadku propozycji Komisji Europejskiej w próbie ujednoczenia standardów badawczych elewacji wentylowanych model średniej skali i dużej skali w przeciwieństwie do innych procedur badawczych nie różnią się gabarytami platform badawczych, a wyłącznie wielkością komór spalania. Źródłem paliwa dla przedstawionej procedury miałyby być belki drewniane, zaadaptowane z normy BS 8414 Series: Fire performance of external cladding systems. Test method for non-loadbearing external cladding systems applied to the masonry face of a building, Building Research Establishment [23]. Parametrem wyjściowym wykonywanego badania byłaby całkowita moc pożaru (z ang. *Total heat output*) równa 4500 MJ w okresie 30 min z przebiegiem HRR  $3 \pm 0,5$  MW. HRR (z ang. *Heat Release Rate*) definiuje się jako szybkość wydzielania ciepła podczas pożaru, jest wyrażone w MW. Zaproponowano również propozycję klasyfikacji elewacji. Klasyfikacja opierałaby się na ocenie ilości spadających części elementów oraz ewentualnym stopniu spalania tych części elementów – przedstawiono ją w tabeli 3.9.

**Tabela 3.9.** Proponowany system klasyfikacji [42]

Klasyfikacja	Opis
LS1	Badanie dużej skali spełniające warunki rozprzestrzeniania się płomieni oraz spadających/ palących się części elementów.
LS2	Badanie dużej skali spełniające warunki rozprzestrzeniania się płomieni, ale nie spełniające spadających/ palących się części elementów.
LS3	Badanie średniej skali spełniające warunki rozprzestrzeniania się płomieni oraz spadających/ palących się części elementów.
LS4	Badanie średniej skali spełniające warunki rozprzestrzeniania się płomieni, ale nie spełniające spadających/ palących się części elementów.



W dokumencie [42] zaproponowano również propozycję oceny i wymagania dotyczące oceny dla poszczególnych klas – prezentuje je tabela 3.10.

**Tabela 3.10.** Proponowane graniczne wartości dla systemu klasyfikacji [42]

<b>Funkcja</b>	<b>Klasyfikacja</b>	<b>Propozycja wartości</b>
Ograniczenie rozprzestrzenianie się ognia	LS1 i LS2	<p>Pionowe rozprzestrzenianie się ognia            Żadna termopara umieszczona na płaszczyznach poziomych (na wysokości: 4,5 m i 5,9 m) nie może wskazywać temperatury wyższej niż 500 K w okresie 30 sekund w czasie trwania badania wynoszącego 60 minut.</p> <p>Poziome rozprzestrzenianie się ognia            Żadna termopara umieszczona na płaszczyzna pionowych znajdujących się w odległości 2,75 m od narożnika na ścianie głównej i w odległości 1,45 m od narożnika na ścianie bocznej: nie może wskazywać temperatury wyższej niż 500 K w okresie 30 sekund w czasie trwania badania wynoszącego 60 minut.</p>
Ograniczenie rozprzestrzenianie się ognia	LS3 i LS4	<p>Pionowe rozprzestrzenianie się ognia            Żadna termopara umieszczona na płaszczyznach poziomych (na wysokości: 3,5 m i 5,9 m) nie może wskazywać temperatury wyższej niż 500 K w okresie 30 sekund w czasie trwania badania wynoszącego 60 minut.</p> <p>Poziome rozprzestrzenianie się ognia            Żadna termopara umieszczona na płaszczyzna pionowych znajdujących się w odległości 2,75 m od narożnika na ścianie głównej i w odległości 1,45 m od narożnika na ścianie bocznej: nie może wskazywać temperatury wyższej niż 500 K w okresie 30 sekund w czasie trwania badania wynoszącego 60 minut.</p>
Połączenie fasady z stropem	opcjonalnie	Żadna termopara mieszcząca się przy połączeniu między podłogą a fasadą nie może przekraczać wzrostu temperatury o 180 K. Nie może występować płonący się płomień z tylnej strony badanej elewacji przez okres dłuższy niż 10s.
Żarzenie się elementów	opcjonalnie	Żadna termopara mieszcząca się w celu zastosowania tłącego się nie może przekraczać 50°C, 6 godzin po zakończeniu okresu obserwacji/ gaszenia pożaru.
Odpadające części elementów/ palące krople	LS1 i LS3	Wymagania przedstawiono powyżej.

Analizując wszystkie działania Unii Europejskiej [19, 40, 42], należy stwierdzić, że kwestią czasu jest ujednoczenie przepisów we wszystkich krajach wspólnoty celem łatwiejszej oceny systemów elewacji wentylowanych. Do tego czasu badania wykonane w jednym kraju w zakresie opiniowania rozwiązań mogą nie być respektowane przez inne kraje. Z uwagi na konieczność wykonania nowych platform badawczych oraz wymiarów tych platform koszty badań w poszczególnych krajach znacząco wzrosną.

### **3.2 Bezpieczeństwo pożarowe elewacji wentylowanej**

Przepisy prawa i literatura przedmiotu nie podają definicji bezpieczeństwa pożarowego. Pojęcie to jest jednak powszechnie stosowane i wielokrotnie przywoływane w przepisach prawa krajowego i Unii Europejskiej. Bezpieczeństwo pożarowe jest również przywoływane w rozporządzeniu dotyczącym warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [132], przy spełnieniu podstawowych wymagań dotyczących obiektów budowlanych, przywołane m.in. obok: nośności i stateczności konstrukcji, higieny, zdrowia i środowiska, bezpieczeństwa użytkowania, dostępności obiektów itd. Zgodnie z nim [132] budynek i urządzenia z nim związane powinny być projektowane i wykonane w sposób ograniczający możliwość powstania pożaru, a w razie jego wystąpienia – w sposób zapewniający:

- zachowanie nośności konstrukcji przez określony czas;
- ograniczenie rozprzestrzeniania się ognia i dymu wewnątrz budynku;
- ograniczenie rozprzestrzeniania się pożaru na sąsiednie obiekty budowlane lub tereny przyległe;
- możliwość ewakuacji ludzi lub ich uratowania w inny sposób;
- uwzględnienie bezpieczeństwa ekip ratowniczych.

Bezpieczeństwo pożarowe wg powyższych wymagań dotyczy głównie działań obszaru prewencyjnego ochrony przeciwpożarowej [167]. Jest ono osiągnięte dzięki skuteczności systemu ochrony przeciwpożarowej, w ramach której są podejmowane działania prewencyjne, prowadzona jest profilaktyka i edukacja społeczna, a także utrzymywana jest zdolność do podejmowania i prowadzenia działań ratowniczych. Ochrona przeciwpożarowa jest to szereg działań, które mają na celu zabezpieczenie życia, zdrowia, mienia i środowiska przed pożarem, klęską żywiołową albo jakimkolwiek innym zagrożeniem miejscowym.

Elewacje wentylowane muszą spełniać szereg warunków i wymogów w ramach zabezpieczenia ich przed oddziaływaniem wysoką temperaturą i płomieniami w sytuacji pożaru. Niestety, wielokrotnie zapewnienie i spełnienie wszystkich wymagań stawianych pojedynczym elementom, tj. podkonstrukcja/ruszt, okładzina, izolacja może nie zapewnić pełnego bezpieczeństwa w warunkach pożaru dla całego systemu elewacji wentylowanej. Ocenę kompletnego systemu elewacji przeanalizowano w rozdziale 3.1.2. Elewacje wentylowane borykają się z wieloma problemami w zakresie bezpieczeństwa przeciwpożarowego, są to m.in.: mechanizm rozprzestrzeniania się ognia

między kondygnacjami (dotyczy to również elewacji ETICS), efekt kominowy, problem z odpadaniem części elementów elewacji podczas pożaru, stosowanie materiałów, które rozprzestrzeniają ogień, wytrzymałość szyb w warunkach pożaru i inne. W przypadku pożarów elewacji rzadko kiedy można wskazać tylko jeden mechanizm lub jeden czynnik, który przyczynia się do jego rozwoju.

Niechlubnym przykładem może być tragiczny pożar Grenfell Tower w Londynie w 2017 r. przedstawiony na rysunku 3.8. Na tragiczny pożar w Londynie wpływ miały różne czynniki, m.in.: zastosowane okładziny zewnętrzne – materiały kompozytowe z palnym rdzeniem, rozwiązanie techniczne elewacji (elewacja wentylowana) czy rozprzestrzenianie się pożaru przez efekt kondygnacji – kondygnacja (z ang. *the leap-frog effect*).

Dopiero po tragicznym pożarze w Londynie problematyka elewacji wentylowanej została poruszona na ogólnodostępnym europejskim forum i rozpowszechniona w większym stopniu. Był on elementem, od którego rozpoczęły się działania Komisji Europejskiej w zakresie ujednoczenia przepisów w krajach wspólnoty Europejskiej [63], co zostało szerzej omówione w pkt. 3.1.2.



**Rys. 3.8.** Pożar Grenfell Tower w Londynie w 2017 r. [70]

### **3.2.1 Rozprzestrzenianie się pożaru pomiędzy kondygnacjami po elewacji**

W przypadku budynków pożary mogą rozprzestrzeniać się na wiele sposobów i przy udziale wielu czynników, które to mają wpływ na skalę zniszczeń, oraz szybkość zajmowanych kolejnych stref. W bieżącym punkcie analizie poddano zagadnienie rozprzestrzeniania się pożaru po elewacji budynku. Na taki rozwój pożaru wpływ mają zastosowane materiały według klasyfikacji ogniowej [116], rodzaj technicznego rozwiązania elewacji itd. W przypadku elewacji wentylowanej przestrzeń wentylacyjna

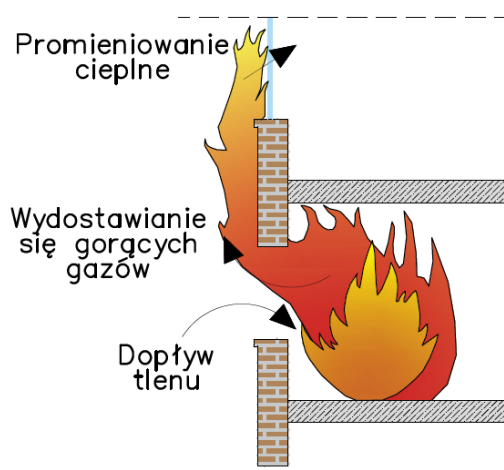
może również przyczyniać się do szybkości rozprzestrzeniania się ognia pomiędzy kondygnacjami. Ogień przemieszczający się w przestrzeni wentylacyjnej wykorzystuje efekt tzw. ciągu kominowego [18, 20, 28, 88, 99]. Wpływ na rozwój pożaru mają również siła i kierunek wiatru, płomienie mogą być „wpychane” lub „wyciągane” z pomieszczenia. W przypadku „wyciągania” płomieni z pomieszczenia pożar ma większe możliwości rozwoju po elewacji. Kolejnymi aspektami są temperatura zewnętrzna oraz wilgotność powietrza. Szczególnie wysoka wilgotność powietrza powoduje, że pożar rozwija się mniej intensywnie oraz łatwiej go kontrolować, ponieważ znaczna część energii pożaru jest absorbowana przez wilgotne powietrze i procesy przekształcające drobinki wody w powietrzu w parę wodną, co jest zbliżone do zasady działania mgły wodnej.

W przypadku pożaru w obrębie elewacji ogień może przedostawać się pomiędzy kondygnacjami, dostając się do wnętrza pomieszczeń przez otwory tj. okna, drzwi lub przewały instalacyjne.

Początek rozpoczyna się wewnątrz pomieszczenia zajętego pożarem i zniszczeniem przeszkody oddzielającego ją od przestrzeni „zewnętrznej”, którą jest np. szyba w oknie. Może to spowodować wydostanie się płomieni oraz gorących gazów na zewnątrz budynku. W taki sposób rozpoczyna się oddziaływanie wysokimi temperaturami na elewację. Przy odpowiedniej mocy pożaru płomienie mogą zostać wyniesione na wysokość okien na wyższej kondygnacji – wynika to zazwyczaj z niedostatecznej wysokości pasa międzykondygnacyjnego (z ang. *spandrel*). Odpowiednio wysoka temperatura w obrębie szyby w oknie na wyższej kondygnacji może ją zniszczyć i zapewnić przedostanie się płomieni wewnątrz pomieszczenia, powodując rozwój pożaru w tym pomieszczeniu. Rozprzestrzenianie się pożaru pomiędzy kondygnacjami po elewacji nazywamy również efektem kondygnacja – kondygnacja lub efektem tzw. żabiego skoku (z ang. *The Leap Frog Effect*). Mechanizm ten można opisać w poniższy sposób.

1. Pożar wewnątrz pomieszczenia w budynku rozwija się, płomienie przemieszczają się coraz bliżej okien oraz zajmują ogniem wszystkie materiałów składowane przy nich.
2. Szyba w oknie ulega uszkodzeniu na skutek strumienia ciepła oddziałującego na nią (konwekcja).
3. Płomienie i gorące gazy wydostają się przez uszkodzone szyby na elewację.
4. Płomienie, będące w kontakcie z elewacją, oddziałują na nią oraz na przeszklenia na wyższych kondygnacjach, uszkadzając szyby i przedostając się do wnętrza pomieszczeń, zajmując ogniem pomieszczenie.

Na rysunku 3.9. przedstawiono mechanizm rozprzestrzeniania się pożaru pomiędzy kondygnacjami po elewacji.



**Rys. 3.9.** Mechanizm rozprzestrzeniania się pożaru pomiędzy kondygnacjami po elewacji [7, 131]

Zjawisko rozprzestrzeniania się pożaru pomiędzy kondygnacjami można analizować poprzez badanie modeli rzeczywistych elewacji w skali naturalnej (z ang. *large-scale facade test*) lub przy wykorzystaniu modeli numerycznych. W większości przypadków modele numeryczne stanowią dobrą alternatywę dla badań na modelach rzeczywistych elewacji [37]. W przypadku analizowania takich zjawisk na większą skalę należy jednak wykonać walidację modelu numerycznego z modelem rzeczywistym. Większość walidacji wykazuje zbieżne wyniki do badań na modelach rzeczywistych, co opisano m.in. w pracach [7, 131].

Pierwszym krokiem do zaistnienia mechanizmu przeskoku pomiędzy kondygnacjami po części zewnętrznej elewacji jest odpowiedni rozwój pożaru wewnątrz pomieszczenia oraz jego przedostanie się w okolice otworu okiennego. Procedury dla badania modelu elewacji w skali naturalnej, m.in. BS 8414-1 [23], przyjmują jako wartość referencyjną pożaru spalanie dziecięcego łóżeczka bezpośrednio przy otworze. Spalanie odwzorowuje wartość 4500 MJ uwalnianych w czasie 30 minut ze szczytową wartością mocy  $3 \text{ MW} \pm 0.5 \text{ MW}$ .

Zniszczenie szyby oraz wydostanie się płomieni przez otwór jest kolejnym krokiem rozwoju pożaru, jednakże nie zawsze jest to równoznaczne z rozprzestrzenieniem się pożaru na wyższe kondygnacje po elewacji. W przypadku pożaru w pomieszczeniu szyba hartowana pęka i spada w postaci drobnych fragmentów po około 5 minutach oddziaływania ognia. Przykładowe badanie oddziaływania ognia na szybę przedstawiono na rysunku 3.10.



**Rys. 3.10.** Zachowanie zespolonego przeszklenia podczas standardowego oddziaływania ognia.

Widok zniszczenia wewnętrznej szyby hartowanej w 5 min oddziaływania ognia [Paweł Sulik, ITB]

Po zniszczeniu szyby do kondygnacji objętej pożarem dopływa większa ilość tlenu przyspieszająca rozwój pożaru. Wydostające się płomienie na elewację zazwyczaj przylegają do niej, spowodowane jest to przepływem powietrza wzdłuż budynku, który jest kolejnym elementem ułatwiającym uzyskanie znacznej wysokości poprzez płomienie oraz transportem gorących gazów. Kształt wydostających się płomieni oraz ewentualne przyleganie do elewacji zależne jest również od kształtu i wymiarów okien – analizowano to m.in. w publikacjach [25, 57, 109]. Kolejno następuje wymiana gazów i cieplejszego powietrza zimniejszym. Zjawisko to nazywane jest promieniowaniem cieplnym. Warunkiem koniecznym do zaistnienia efektu kondygnacja – kondygnacja jest „wyniesienie” płomieni oraz gorących gazów na odpowiednią wysokość tak, aby były one w bezpośrednim kontakcie z oknem (szybą) na wyższej kondygnacji. Taka sytuacja jest możliwa, gdy pożar ma odpowiednią moc. W pracach [91, 109] wykazano, że moc pożaru wewnątrz pomieszczenia przeważnie wynosi ok. 5,5 MW, co jest wartością większą niż w przypadku badania modelu rzeczywistego elewacji w skali naturalnej, wynoszącej zazwyczaj  $3 \text{ MW} \pm 0.5 \text{ MW}$ . Płomienie przy takiej mocy osiągają odpowiednią wysokość i odpowiednią wartość oddziaływania gęstości strumienia ciepła (z ang. *total heat flux density*) na szybę, żeby ją zniszczyć. Korrhoff w swojej pracy [91] przytacza wartość mocy pożaru po stronie zewnętrznej otworu 1.5 MW jako moc wystarczającą do zaistnienia mechanizmu przeskoaku pożaru pomiędzy kondygnacjami. W pracach naukowych [6, 91] przedstawiono symulacje numeryczne zgodne z metodami badawczymi przedstawionymi w: SP Fire 105 [157], BS 8414-1 [23] oraz ISO 13785-2 [81]. Standardy te opisują sposób badania elewacji w zakresie oddziaływania pożaru. Wyniki minimalnie różnią się od siebie, lecz autorzy uzyskali wartość strumienia cieplnego na wysokości 1,6 m powyżej otworu poniżej  $30 \text{ kW/m}^2$  dla standardu ISO [81], a w przypadku standardu BS 8414-1 [23] ta wartość jest minimalnie niższa. Rogan w swojej pracy [131] także przedstawił symulacje numeryczne przeprowadzone dla różnych gabarytów okien. Otrzymał on wyniki o najniższej gęstości

strumienia ciepła  $9 \text{ kW/m}^2$  na poziomie  $0,92 \text{ m}$  powyżej okna (stosując najbardziej niekorzystny układ otworów). Przy odpowiednich gabarytach okna, przez które wydostają się płomienie, można osiągnąć wartość nawet  $35 \text{ kW/m}^2$  na poziomie  $0,92 \text{ m}$  i  $9 \text{ kW/m}^2$  na poziomie  $+3,05 \text{ m}$  powyżej okna.

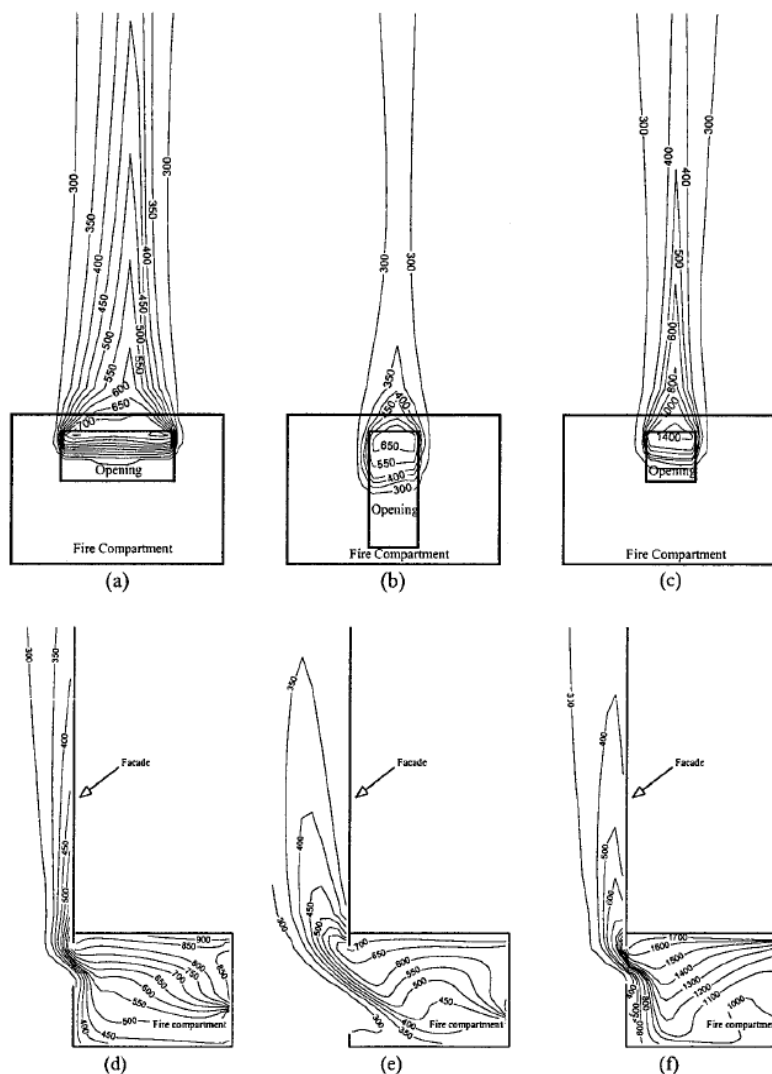
Jednym z pierwszych badaczy tego efektu był Oleszkiewicz, który w pracy [x109] analizował na modelu rzeczywistym pióropusz płomieni wydostający się z otworu okiennego oraz możliwości rozprzestrzeniania się go na powyższe kondygnacje. Badania wykonane były na modelu rzeczywistym w skali dużej, przeprowadzono je dla różnych przypadków wartości szczytowej mocy pożaru, przy założeniu różnych wymiarów otworów, przez które wydostawał się ogień. Wyniki badań rzeczywistych przedstawiono w tabeli 3.11.

**Tabela 3.11.** Wartość oddziaływania strumienia ciepłego w zależności od wymiarów otworu okiennego oraz szybkości uwalniania ciepła przez pożar [109]

Okno [Szer. × Wys.]	Wysokość powyżej okna	Strumień oddziaływania ciepłego $[\text{kW/m}^2]$ w zależności od szybkości uwalniania ciepła przez pożar:			
		5,5 MW	6,9 MW	8,6 MW	10,3 MW
[m]	[m]	5,5 MW	6,9 MW	8,6 MW	10,3 MW
0,94 × 2,00	0,5	43,9	58,6	75,5	-
	1,5	12,4	17,7	25,9	-
	2,5	7,7	9,9	15,9	-
	3,5	3,9	5,1	8,1	-
0,94 × 2,70	0,5	19,2	34,8	53,2	68,3
	1,5	6,3	10,4	15,9	23,2
	2,5	3,5	6,0	9,8	13,7
	3,5	1,7	3,0	4,8	6,7
2,60 × 1,37	0,5	24,5	53,2	104,3	208,7
	1,5	22,9	33,1	58,6	122,4
	2,5	13,2	17,2	51,2	103,9
	3,5	11,5	15,6	28,3	56,5
2,60 × 2,00	0,5	10,5	17,4	29,5	43,4
	1,5	5,2	9,4	14,8	20,8
	2,5	4,5	7,4	12,6	16,3
	3,5	2,9	5,4	8,2	9,6
2,60 × 2,70	0,5	6,5	11,4	17,4	29,1
	1,5	2,9	5,3	8,1	12,8
	2,5	2,0	4,2	5,7	9,1
	3,5	1,4	2,9	3,6	5,6

Oleszkiewicz [109] przedstawił w swoich badaniach, iż na strumień oddziaływania cieplnego poza szybkością uwalniania ciepła wpływ mają również wymiary oraz geometria otworu okiennego. Oddziaływanie strumienia cieplnego wzrasta dużo szybciej w zależności od wymiarów otworu okiennego aniżeli od szybkości uwalniania ciepła przez pożar, różnice strumienia cieplnego wzrastają wraz z wysokością nad paleniskiem. Duże okna pozwalają na spalenie większej ilości paliwa w komorze pożarowej (w pokoju), co powoduje zmniejszenie temperatury i wysokości pióropusza ognia. Wysokie okna mają tendencję do projekcji płomieni z dala od elewacji, zmniejszenia stężenia gorących gazów w bezpośredniej bliskości elewacji, a to powoduje niską ekspozycję termiczną na elewację.

Bazując na pracach Oleszkiewicza [109], D. Chen i inni w swojej pracy [25] przeprowadzili numeryczne doświadczenia w zakresie wpływu gabarytów okna na parametry oddziaływania ciepłem oraz kształt pióropusza. Przyjęto tam 3 gabaryty okien:  $2,24 \times 0,96$  m,  $0,96 \times 2,24$  m oraz  $0,96 \times 0,96$  m. Badania numeryczne dały wnioski podobne z tymi z prac Oleszkiewicza. Wszystkie kształty pióropuszy oraz izolinie temperatur dla sytuacji pożaru wydostającego się z pomieszczenia z badań Oleszkiewicza [x109] przedstawiono na rysunku 3.11.







**Rys. 3.11.** Pola oddziaływania temperaturą podczas pożaru w zależności od gabarytów okna [25]

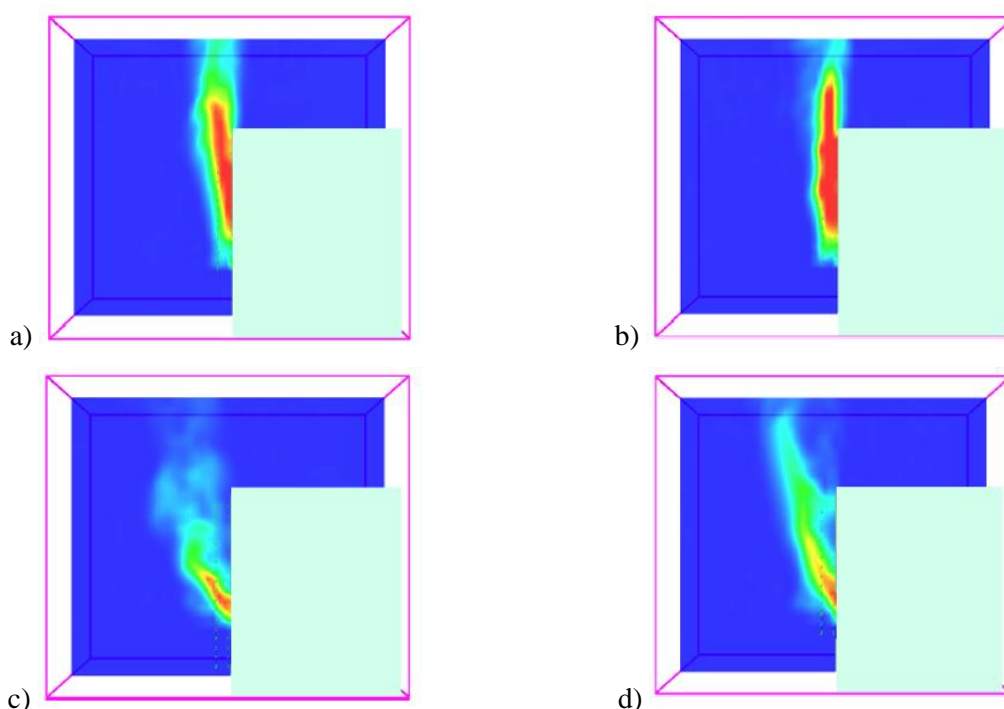


Również Ibrahim i inni w pracy [57], bazując na modelach rzeczywistych Oleszkiewicza, dokonali symulacji numerycznej celem oceny rozwoju pożaru oraz kształtu płomieni wydostających się przez otwory okienne, uwzględniając przy tym analizę wpływu kształtu i rozmiaru okien. Autorzy pracy oparli swoje wnioski o symulacje numeryczne CFD, przyjmując cztery rodzaje otworów okiennych przedstawionych w tabeli 3.12.

Kształt wydostających się płomieni dla otworów okiennych nazywanych pióropuszem przedstawiono na rysunku 3.12. Zauważalne są różnice w kształcie pióropusza pożaru w zależności od kształtu i wymiarów okien – im niższe i szersze otwory okienne, tym płomień bardziej przylega do elewacji. Jest to sytuacja dużo bardziej niekorzystna z punktu widzenia rozprzestrzeniania się pożaru pomiędzy kondygnacjami oraz oddziaływania wysokimi temperaturami na elewacje. Dodatkowo w przypadku otworów okiennych o małej wysokości temperatury są znacznie wyższe w sąsiedztwie szyb na kondygnacjach powyżej.

**Tabela 3.12.** Konfiguracja wymiarów otworów okien [57]

Kształt	Wymiary (szerokość × wysokość)	Powierzchnia [m <sup>2</sup> ]
	2,24 × 0,96 m	~2,15
	0,96 × 0,96 m	~0,92
	0,96 × 2,24 m	~2,15
	1,465 × 1,465 m	~2,15



**Rys. 3.12.** Kształt płomieni wydostających się z otworów okiennych [57]: a) wymiary:  $2,24 \times 0,96$  m; b) wymiary:  $0,96 \times 0,96$  m; c) wymiary:  $0,96 \times 2,24$  m; d) wymiary:  $1,465 \times 1,465$  m [41]

Autor niniejszej pracy również uczestniczył w badaniach dotyczących rozpoznania tego problemu, lecz był to znacznie szerszy zakres aniżeli opisane analizy w artykułach [25, 57]. Wyniki badań i analiz opisano w pracy [141], gdzie autorzy przyjmując kilka grup modeli, analizowali możliwość przeskoku ognia pomiędzy kondygnacjami na podstawie badań numerycznych. Badania były przeprowadzone w oprogramowaniu *Fire Dynamic Simulation*. Wymiary poszczególnych modeli przedstawiono w tabeli 3.13.

**Tabela 3.13.** Zestawienie wysokości kondygnacji i wielkości otworów dla przyjętych modeli [141]

Nr grupa	Nr modelu	Wysokość kondygnacji	Wymiary otworów (szer. $\times$ wys.)
Grupa 1	Model 1	2750 mm	$1200 \times 1200$ mm <sup>2</sup>
	Model 2	3250 mm	$1200 \times 1200$ mm <sup>2</sup>
	Model 3	3750 mm	$1200 \times 1200$ mm <sup>2</sup>
Grupa 2	Model 4	2750 mm	$1500 \times 1500$ mm <sup>2</sup>
	Model 5	3250 mm	$1500 \times 1500$ mm <sup>2</sup>
	Model 6	3750 mm	$1500 \times 1500$ mm <sup>2</sup>
Grupa 3	Model 7	2750 mm	$1200 \times 1350$ (do stropu) mm <sup>2</sup>
	Model 8	3250 mm	$1200 \times 1850$ (do stropu) mm <sup>2</sup>
	Model 9	3750 mm	$1200 \times 2350$ (do stropu) mm <sup>2</sup>

Badania te wykazały, że niewiele form konfiguracji okien i wysokości kondygnacji uniemożliwia transfer pożaru pomiędzy kondygnacjami po elewacji. Jedynie w modelach 8 i 9 nie zaistniał mechanizm przeskoiku pożaru pomiędzy kondygnacjami po elewacji. Warunki w tychże modelach były skrajnie niekorzystne dla wystąpienia takiego efektu (duże gabaryty okien, przy jednocześnie bardzo wysokich kondygnacjach), co spowodowało, iż prędkość wylotowa gazów i płomieni z pomieszczenia była niska.

Prace naukowe [25, 57, 109, 141] wskazują, iż wysokość kondygnacji, kształt okna oraz ich wielkość mają znaczący wpływ na transfer pożaru pomiędzy kondygnacjami. Ponadto niemalże nie istnieją możliwości zabezpieczenia się przed tym efektem w sposób pasywny.

Kotthoff w pracy [89] badał efekt przeskoiku pożaru pomiędzy kondygnacjami na podstawie rzeczywistego pożaru, próbując utworzyć funkcję zależności zajmowania się pożarem kolejnych kondygnacji do czasu. W jego analizach pożar zajmuje drugą kondygnację po czasie 12'00" minut od rozpoczęcia się pożaru, w 20'00" minucie zajęta zostaje kolejna kondygnacja. Od 25'00" minuty pożaru rozpoczyna rozprzestrzenianie się nie tylko w pionie, ale również w poziomie pomiędzy kolejnymi oknami. Rozwój pożaru przedstawiono na rysunku 3.13.



a)

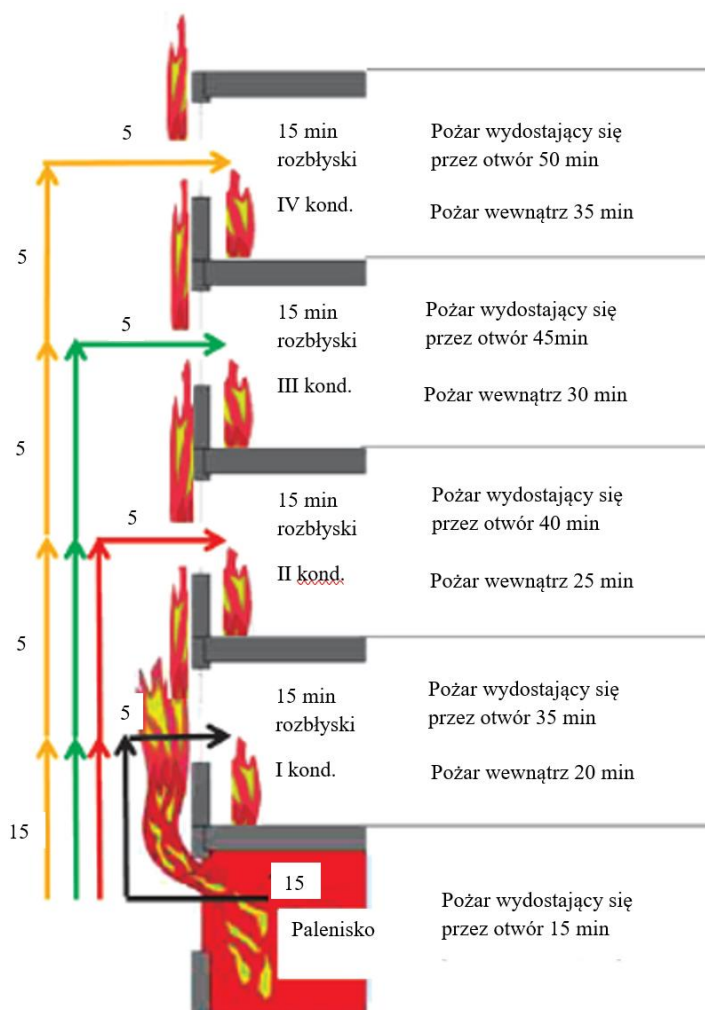
b)

c)

**Rys. 3.13.** Rozwój rzeczywistego pożaru przez mechanizm przeskoiku pomiędzy kondygnacjami po elewacji [48]: a) 12'00" minuta pożaru – płomienie wydobywają się z pierwszej kondygnacji; b) 20'00" minuta pożaru – płomienie przedostają się na drugą kondygnację; c) 25'00" minuta pożaru – płomienie przedostają się również w poziomie pomiędzy oknami [89]

W pracy [91] Kotthoff na podstawie wcześniej zebranych danych (przedstawionych m.in. w pracy [89]) przedstawił uśredniony czas rozwój pożaru poprzez mechanizm przeskoiku pomiędzy kondygnacjami na przykładzie elewacji ETICS. Pożar inicjujący ma miejsce na pierwszej kondygnacji, a płomienie potrzebują 15'00" minut na wydostanie się na zewnętrzną część elewacji. W kolejnym

etapie (około 20'00" minuty) płomienie przedostają się na drugą kondygnację. Pożar w tym czasie osiąga pełny rozwój na pierwszej kondygnacji. Płomienie dostają się wewnątrz pomieszczeń, kolejno w 25'00" minucie na drugiej kondygnacji, w 30'00" minucie na trzeciej kondygnacji, 35'00" minucie na czwartej kondygnacji. Wydostawanie się płomieni z co raz to większej liczby okien powoduje drastyczny wzrost mocy pożaru, co powoduje również przyśpieszenie zajmowania się pożarem kolejnych kondygnacji. Cały rozwój pożaru wg koncepcji Kotthoffa przedstawiono na rysunku 3.14.



**Rys. 3.14.** Średni czas rozwoju pożaru w mechanizmie przeskoku pomiędzy kondygnacjami w elewacjach ETICS [154]

Kolejnymi elementami wpływającymi na rozprzestrzenianie się pożaru poprzez efekt kondygnacja – kondygnacja są prędkość i kierunek wiatru. Płomienie mogą być „wpychane” lub „wyciągane” z pomieszczenia w zależności od kierunku wiatru. W przypadku „wyciągania” płomieni z pomieszczenia pożar ma większe możliwości rozwoju po elewacji. Możliwe jest, iż wiatr będzie na tyle mocny, że ogień będzie wdmuchiwany do wnętrza pomieszczenia. Podobny efekt, który będzie

napędzał rozwój i wydostawanie się płomieni z wnętrza, mogą tworzyć np. włączone nawiewy od wentylacji.

Ponadto, temperatura zewnętrzna oraz wilgotność powietrza również ingerują w pożar, a co za tym idzie na możliwy rozwój pożaru pomiędzy kondygnacjami. Szczególnie wysoka wilgotność powietrza powoduje, że pożar rozwija się mniej intensywnie oraz łatwiej go kontrolować, ponieważ znaczna część energii pożaru jest absorbowana przez wilgotne powietrze i procesy przekształcające drobinki wody w powietrzu w parę wodną, co jest zbliżone do zasady działania mgły wodnej.

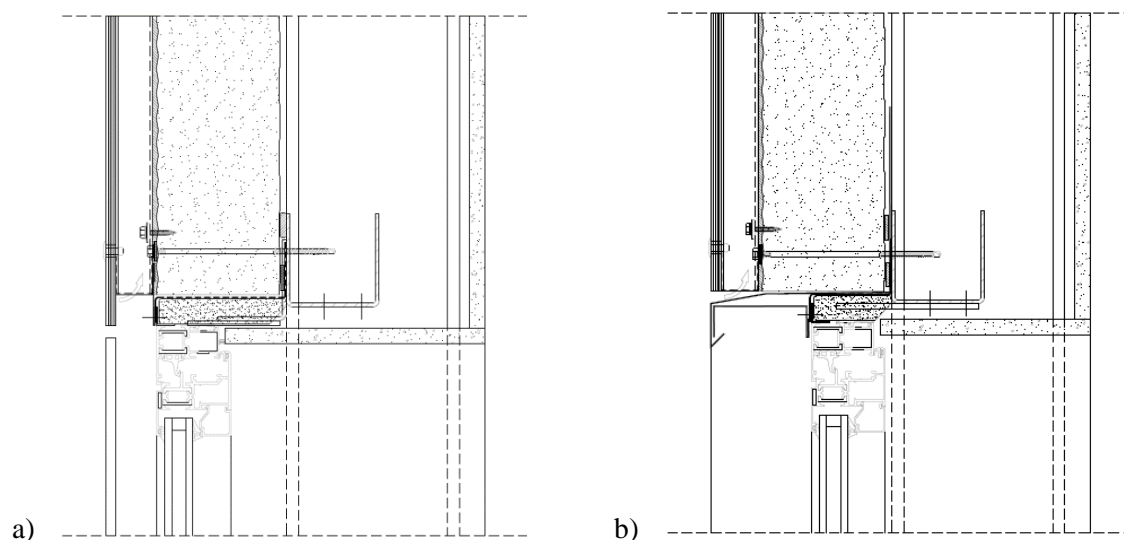
Na podstawie powyższej analizy literaturowej można stwierdzić, że rozwój pożaru przy zajściu mechanizmu przeskoku ognia pomiędzy kondygnacjami jest możliwy, lecz nie zawsze do niego dochodzi. Wpływ na rozwój pożaru poprzez efekt kondygnacja – kondygnacja mają m.in.: moc pożaru, wymiary i kształt otworu, przez który wydobywają się płomienie, wiatr i wilgotność powietrza. W przypadku wpływu wiatru i wilgotności powietrza na efekt mechanizmu przeskoku ognia pomiędzy kondygnacjami brak jest publikacji naukowych umożliwiających dokładne oszacowanie ich znaczenia. Zagadnienie korelacji wpływu wiatru i wilgotności powietrza na mechanizm przeskoku ognia pomiędzy kondygnacjami jest warte rozpoznania w przyszłości.

Bardzo trudno ocenić możliwość zaistnienia mechanizmu przeskoku ognia pomiędzy kondygnacjami po elewacji bez wykonania badań rzeczywistych lub symulacji numerycznych, a nawet, pomimo tych narzędzi, nadal istnieją znaczące braki w literaturze naukowej opisującej ten efekt. Wyeliminowanie takiego rodzaju rozprzestrzeniania się ognia wydaje się praktycznie niemożliwe, ważne jest natomiast podjęcie odpowiednich kroków umożliwiających ograniczenie tego zjawiska. Bardzo istotne jest więc zwiększenie stanu wiedzy w tym zakresie m.in. dzięki badaniom na modelach rzeczywistych.

### **3.2.2 Efekt ciągu kominowego**

Kolejnym zjawiskiem, którego doświadcza się w przypadku występowania pożaru w elewacjach wentylowanych, jest efekt ciągu kominowego. Elewacje wentylowane charakteryzują się przestrzenią wentylacyjną, inaczej nazywaną pustką powietrzną pomiędzy powierzchnią zewnętrzną izolacji a okładziną elewacyjną. Szerokość pustki powietrznej w elewacjach wentylowanych mieści się w przedziale od 20 do 50 mm [41, 148], niektóre źródła podają większe wartości – m.in. od 40 do 100 mm [56]. Również ETAG 034-1 [40] przedstawia dwa wymagania dla elewacji wentylowanych. Pierwszy warunek to to, że odległość między okładziną zewnętrzną a warstwą izolacyjną lub podłożem powinna wynosić co najmniej 20 mm. Przestrzeń tę można lokalnie zmniejszyć od 5 do 10 mm pod warunkiem zweryfikowania, czy nie wpłynie to negatywnie na funkcję sprawności przepływu powietrza. Drugim warunkiem są otwory (szczeliny) wentylacyjne, które powodują dostawanie i wydostawanie się powietrza do i z pustki powietrznej, których to minimalny przekrój poprzeczny musi wynosić co najmniej 50 cm<sup>2</sup> na metr bieżący elewacji.

W przypadku rozwoju pożaru wewnątrz budynku wydostające się płomienie z okna mogą dostawać się do przestrzeni wentylacyjnej poprzez szczeliny wentylacyjne zlokalizowane w obrębie otworów okiennych. Szczeliny wentylacyjne przy glifach pojawiają się w większości rozwiązań dostępnych na rynku. Przykładowe rozwiązania górnego glifu w wersji z bezpośrednim dostępem do szczeliny (a)), oraz z obróbką blacharską (b)) przedstawiono na rysunku 3.15.

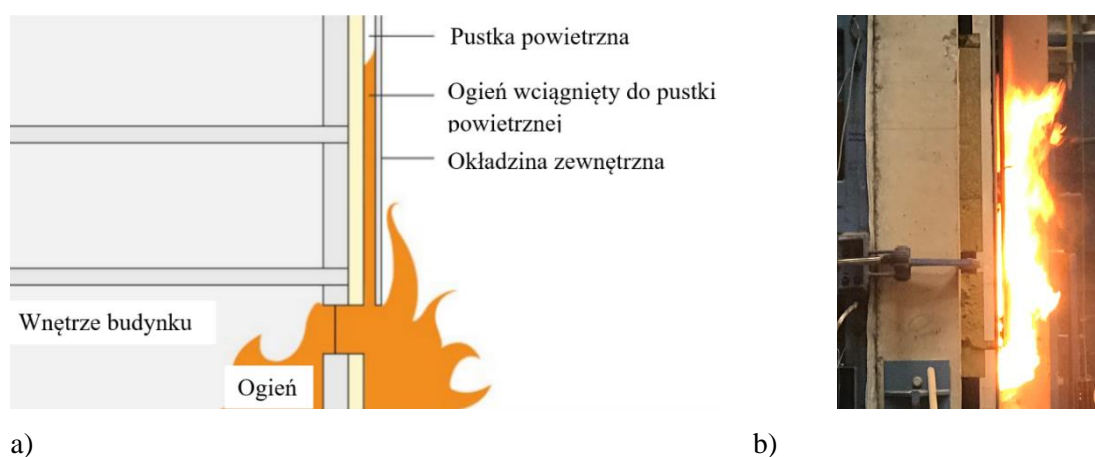


**Rys. 3.15.** Przykładowe styk okna z elewacją – detal górny wg rozwiązań Kingspan: a) rozwiązanie górnego glifu bez obróbki blacharskiej; b) rozwiązanie górnego glifu z obróbką blacharską [71]

Stosowanie szczelin wentylacyjnych w bezpośredniej bliskości okien jest uzasadnione, zapewnia lepszą wentylację pustki powietrznej oraz dobre odprowadzanie z niej wilgoci. Niestety szczeliny wentylacyjne w obrębie otworów okiennych w sytuacji pożaru pozwalają dostawać się płomieniom już we wczesnych fazach pożaru do przestrzeni wentylacyjnej, gdzie płomienie wewnątrz niej wchodzi w interakcje z materiałem izolacyjnym, podkonstrukcją oraz wewnętrzną częścią okładziny elewacyjnej. Ponadto wewnętrzna część okładziny elewacyjnej może być bardziej wrażliwa na oddziaływanie wysokimi temperaturami poprzez m.in. brak utwardzaczy, mniejszej grubości powłoki ochronne itd.

Z uwagi na wzrastającą popularność elewacji wentylowanych ośrodki naukowe zaczęły przeprowadzać badania oraz testy analizujące sytuację, w której płomienie dostają się do wnętrza przestrzeni wentylacyjnej. Płomienie będące wewnątrz przestrzeni wentylacyjnej bardzo szybko osiągają znaczną wysokość, a wysokie temperatury przyczyniają się do destrukcji materiałów wewnątrz niej. Zjawisko to nazywane jest efektem ciągu kominowego z uwagi na podobną zasadę działania jak odprowadzanie spalin w kominach. Jest to zjawisko fizyczne powstawania spontanicznego przepływu cieplejszego gazu (powietrza) z dołu do góry. Siłą napędową efektu kominowego są różnice gęstości wynikające np. z różnicy temperatury pomiędzy powietrzem (lub ściślej: gazem) zewnętrznym

a wewnętrznym (w przewodzie kominu). Wynika z tego, że u podstawy kominu w jego wnętrzu ciśnienie jest mniejsze niż na zewnątrz na tej samej wysokości. Ta różnica ciśnień wywołuje przepływ powietrza. Efekt jest tym większy, im wyższy jest komin i większa różnica temperatur. W przypadku efektu ciągu kominowego w elewacjach wentylowanych zasada działania jest podobna – tzn. płomień dostający się do pustki powietrznej ograniczonej z dwóch stron materiałami zazwyczaj niepalnymi ma tylko jeden kierunek rozprzestrzeniania się. Kierunek rozprzestrzeniania się płomieni jest zgodny z kierunkiem przepływu powietrza – do góry, co jeszcze zwiększa jego wpływ. Efekt jest dodatkowo potęgowany wymianą powietrza cieplejszego z chłodniejszym, powietrze ciepłe transferuje się do góry, ponieważ ma mniejszą gęstość. Te dwa elementy powodują, iż płomień wewnątrz pustki powietrznej osiąga dużo większą wysokość niż płomień poza pustką. Przykład tego zjawiska pokazano na rysunku 3.16.



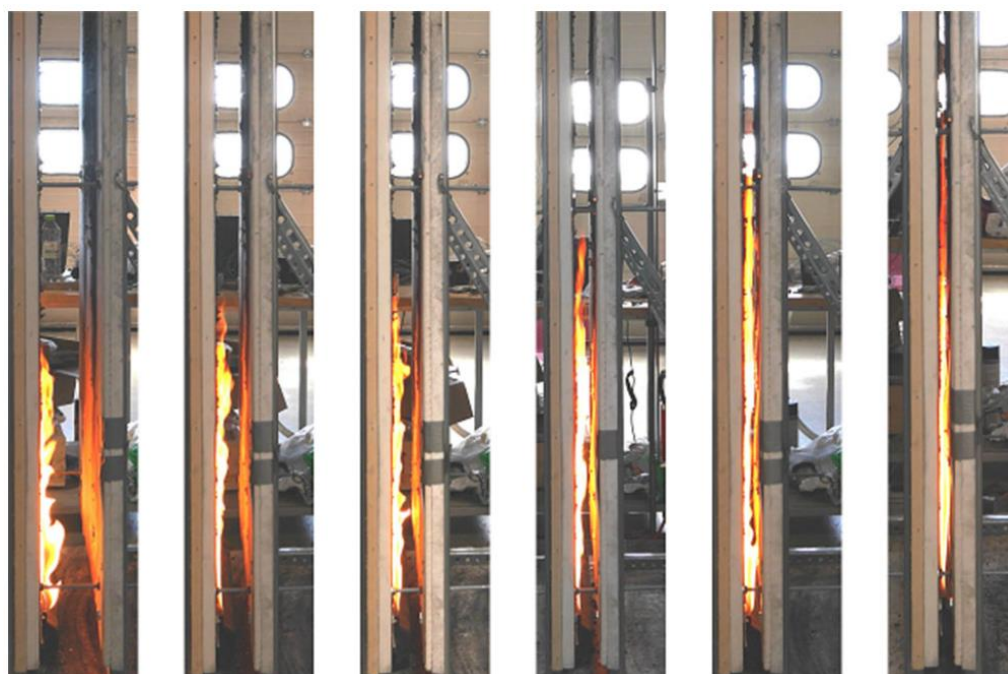
**Rys. 3.16.** Efekt ciągu kominowego: a) schemat działania [22]; b) badania elewacji wentylowanej na modelu rzeczywistym [Materiały własne]

Przy efekcie ciągu kominowego duży wpływ ma pustka powietrzna (nazywana również przestrzenią wentylacyjną). Analizy takie przeprowadzono m.in. w publikacjach [21, 83, 88, 99, 164], wykazując, iż płomień w przestrzeni wentylacyjnej mogą osiągać wysokość nawet 10-krotnie wyższą niż w elementach nieosłoniętych [28]. Livkiss i inni [99] zrealizowali badania pomiędzy korelacją szerokości przestrzeni wentylacyjnej a siłą pożaru – dane te przedstawiono w tabeli 3.14.

Jak przedstawiono w tabeli 3.14 [99], wysokość płomieni oraz moc strumienia ciepła oddziałującego na okładzinę są bardziej niekorzystne w przypadku mniejszej szerokości pustki powietrznej aniżeli w przypadku większej średniej wartości HRR. Wysokość płomieni ukazującą wpływ efektu ciągu kominowego w zależności od szerokości przestrzeni wentylacyjnej przedstawiono na rysunku 3.17 [99].

**Tabela 3.14.** Dane badawcze serii prób [99]

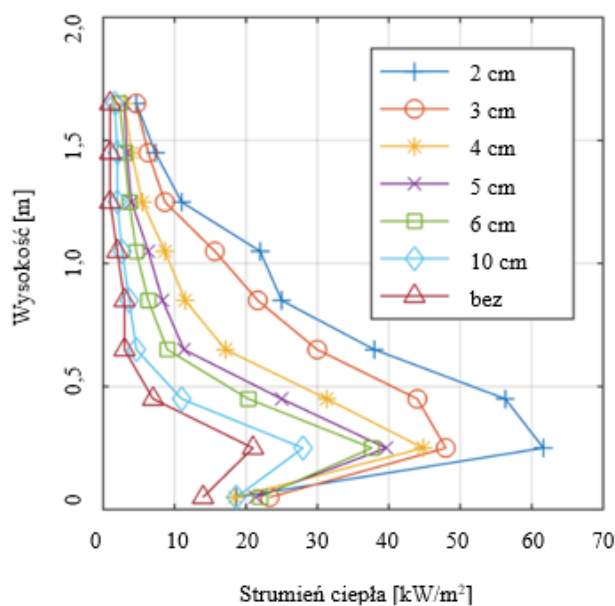
Seria Badania	Średnia wartość HRR [kW/m]	Szerokość pustki powietrznej [m]	Wysokość płomienia [m]	Strumień ciepła na jednostkę powierzchni [W/m <sup>2</sup> ]
I	16,5	0,1, 0,06, 0,05, 0,04, 0,03, 0,02, ściana jednowarstwowa	19	22
II	24,8	0,1, 0,06, 0,05, 0,04, 0,03, 0,02, ściana jednowarstwowa	23	23
III	32,3	0,1, 0,06, 0,05, 0,04, 0,03, ściana jednowarstwowa	16	19
IV	40,4	0,1, 0,06, 0,05, 0,04, ściana jednowarstwowa	12	13



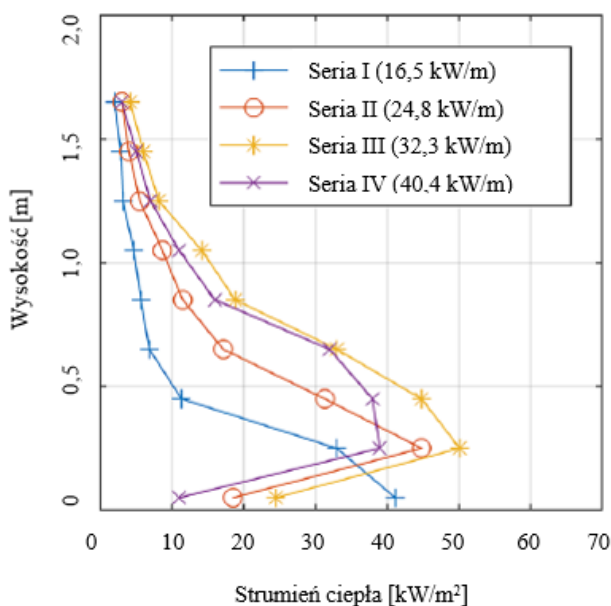
**Rys. 3.17.** Zdjęcia z badań eksperymentalnych dla serii II [x99]

Badania Livkiss i innych [99] przedstawiają dużo większe niebezpieczeństwo rozwoju pożaru poprzez przestrzeń wentylacyjną oraz transfer płomieni pomiędzy kondygnacjami dla przestrzeni wentylacyjnych o mniejszej ich szerokości (20, 30 mm) aniżeli tych szerszych (50, 100 mm). Szerokość pustki powietrznej w przypadku efektu kominowego ma dużo większy wpływ aniżeli moc pożaru. Przykładowe różnice mocy strumienia cieplnego w zależności od wysokości przedstawiono na rysunkach: 3.18 oraz 3.19. Zauważalna jest również druga tendencja – płomienie wraz z wysokością wykazują mniejsze różnice w mocy strumienia cieplnego w zależności od mocy HRR pożaru w przypadku tych o małej szerokości przestrzeni wentylacyjnej – przedstawiono to na rysunkach 3.18 oraz 3.19.





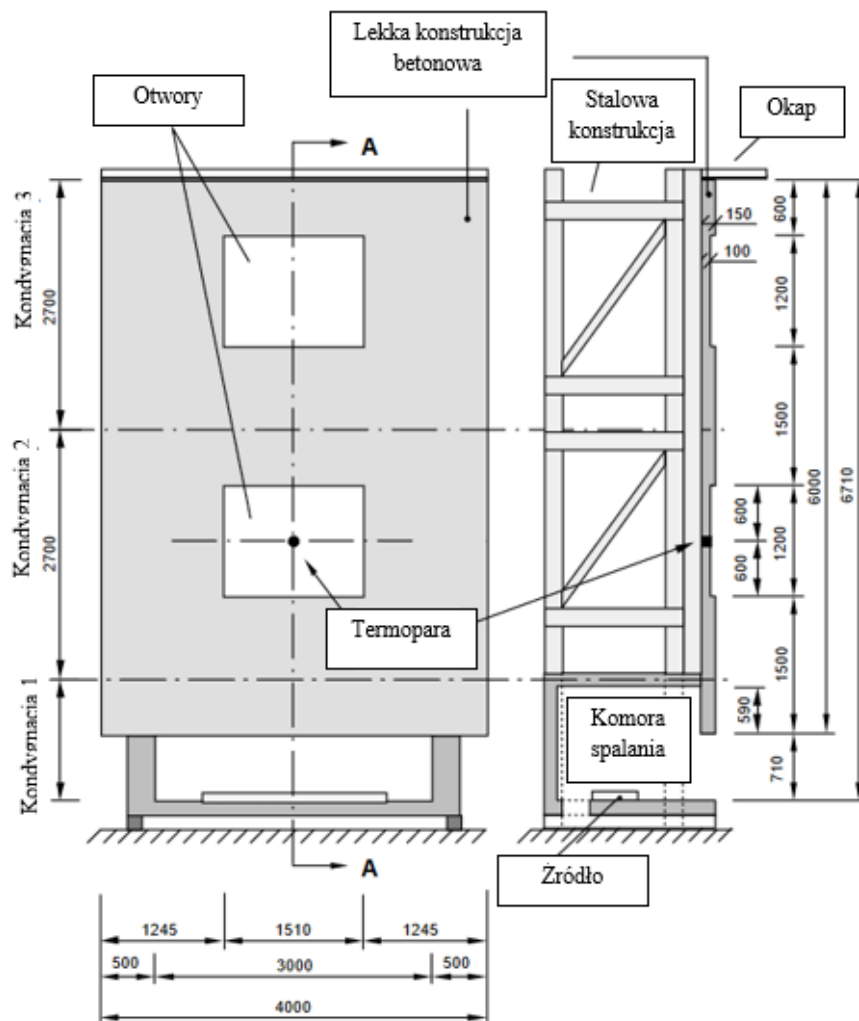
**Rys. 3.18.** Wartość oddziaływania strumieniem ciepłym w linii środkowej ściany dla serii badań [99]



**Rys. 3.19.** Wartość oddziaływania strumieniem ciepłym w linii środkowej ściany w zależności od różnego HRR dla pustki powietrza o szerokości 0,04 m [99]

Również Bostrom i inni w [21] dokonali analizy wpływu przestrzeni wentylacyjnej w warunkach pożaru. W pracy [21] poddano trzy różne wariacje modeli rzeczywistych elewacji w skali dużej, były one wykonane w standardzie SP FIRE 105 [157]. Pierwszy z modeli nie był wyposażony w żadną okładzinę, a warstwą zewnętrzną były elementy nośne wykonane z betonu, drugi model posiadał okładzinę wykonaną ze sklejki bez zastosowania przestrzeni wentylacyjnej, trzeci model oparty był o specyfikację elewacji wentylowanej, gdzie zastosowano przestrzeń wentylacyjną o szerokości

20 mm. Na potrzeby badania przyjętą platformę badawczą przedstawiono na rysunku 3.20 [21], platforma posiadała opomiarowanie termoparami.



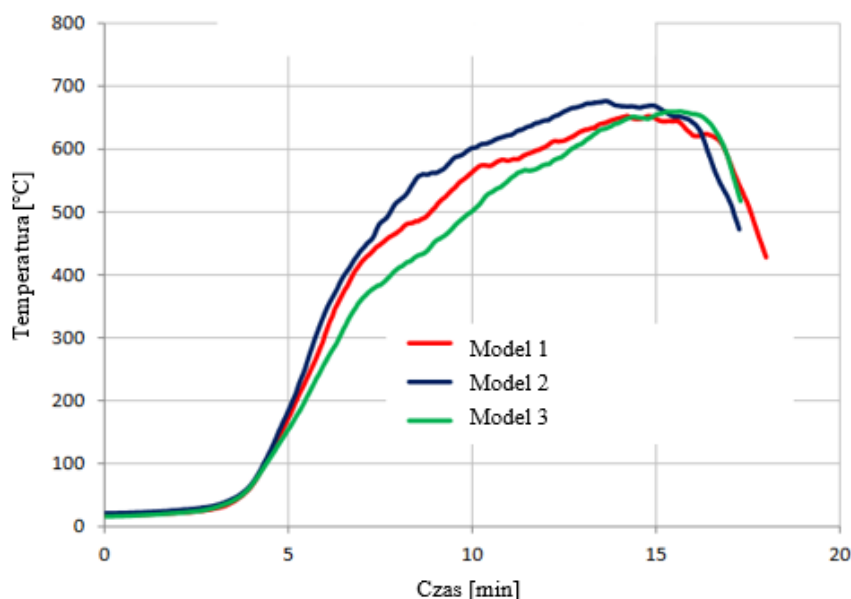
**Rys. 3.20.** Platforma badawcza dla badań Bostrom'a [21]

Bostrom i inni [21] dokonali oceny kluczowych zdarzeń w każdym z trzech wariantów badania, wyniki przedstawia tabela 3.15. Odnotowano, iż w modelach 1 i 2 różnice w szybkości rozwoju pożaru i zasięgu wysokości płomieni są niewielkie. W przypadku modelu 3 zauważalny jest znaczący wzrost w zakresie tempa rozwoju pożaru i zasięgu płomieni. Zastosowanie okładziny palnej powoduje dużo mniejszy wzrost możliwości rozwoju pożaru aniżeli zastosowanie przestrzeni wentylacyjnej.

**Tabela 3.15.** Przebieg poszczególnych testów dla badań Bostrom'a [21]

Przebieg	Model 1	Model 2	Model 3
Start testu	00:00	00:00	00:00
Dym wydostaje się z pomieszczenia	03:30	03:00	03:00 – 04:00
Płomienie sięgają dolnej krawędzi dolnego okna	04:35	04:30	05:00
Płomienie sięgają górnej krawędzi dolnego okna	05:30	05:00	Nie nastąpiło
Płomienie sięgają dolnej krawędzi górnego okna	12:50	09:00	
Płomienie sięgają górnej krawędzi górnego okna	Nie nastąpiło	11:45	05:45
Płomienie sięgają poza platformę		Płomienie nie sięgały	07:30
Zakończenie testu	18:00	17:15	17:45

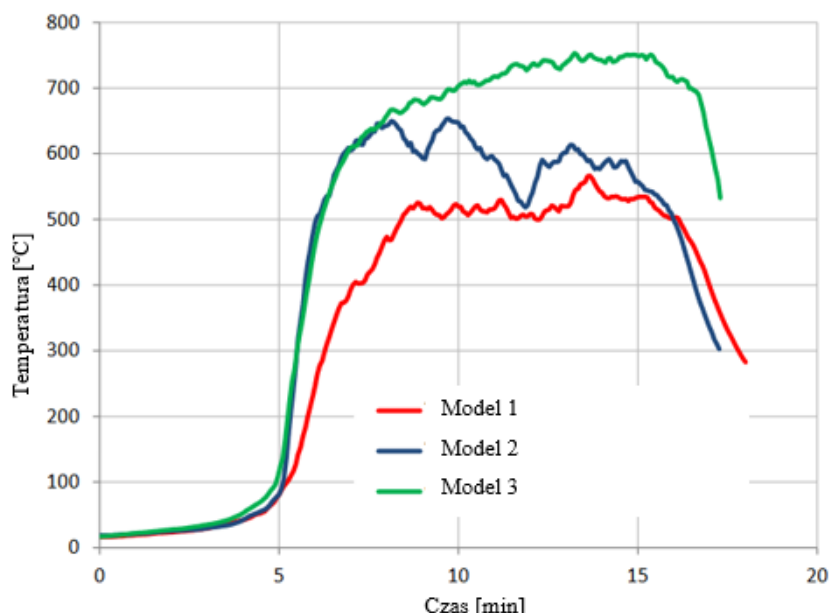
Rozwój pożaru początkowo rozpoczyna się identycznie dla wszystkich modeli. Na rysunku 3.21 przedstawiono krzywą temperatury w funkcji czasu dla wszystkich 3 modeli w lokalizacji 0,5 m nad komorą spalania. Wszystkie krzywe na tej wysokości przebiegają w sposób podobny, choć zauważalne jest, iż dla modelu 3 temperatura w przedziale 5 do 15 min jest najniższa. Spowodowane jest to tym, że płomienie i gorące gazy wyrzucane są powyżej tej wysokości.



**Rys. 3.21.** Średnia temperatura mierzona termoparami 0,5 m nad komorą spalania dla 3 modeli [21]

Przebieg wykresu temperatury na wysokości otworu okiennego 1 piętra (jedną kondygnację powyżej komory spalania) przedstawiono na rysunku 3.22. Model 1 nieposiadający okładziny, wraz ze wzrostem wysokości, wykazuje najniższą wartość temperatury. Wykresy w modelach 2 i 3 w czasie od rozpoczęcia badania do około 8'00" minuty przebiegają w sposób niemalże identyczny i wynoszą

maksymalnie około 650°C. Następnie temperatura dla modelu 2 (bez pustki powietrznej) zaczyna spadać. W tym czasie temperatura na modelu 3 nadal wzrasta i osiąga maksymalnie 750°C. Palna okładzina elewacyjna w modelach 2 i 3 zwiększa ekspozycję na ciepło w tych termoparach. Ponadto zauważalne jest negatywne działanie przestrzeni wentylacyjnej w modelu 3.

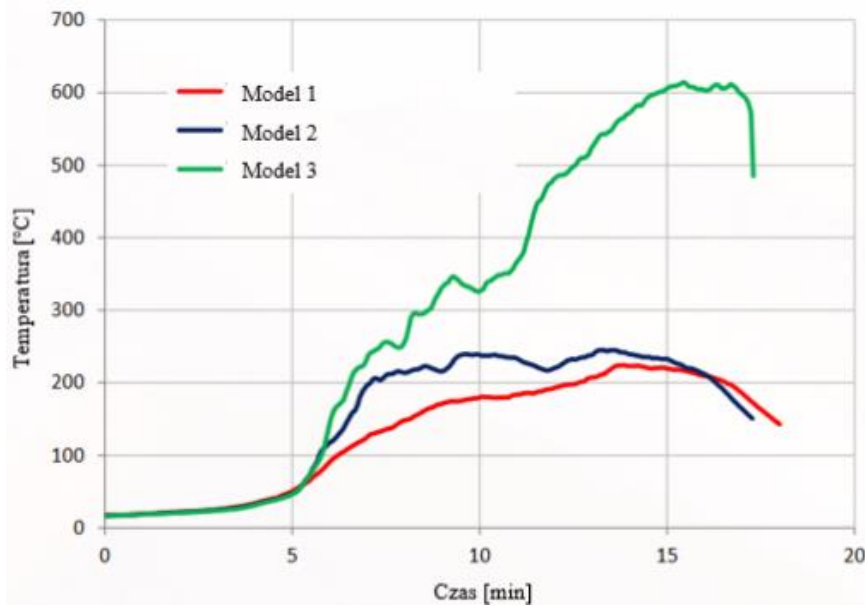


**Rys. 3.22.** Średnia temperatura mierzona termoparami na wysokości 1 piętra dla 3 modeli [21]

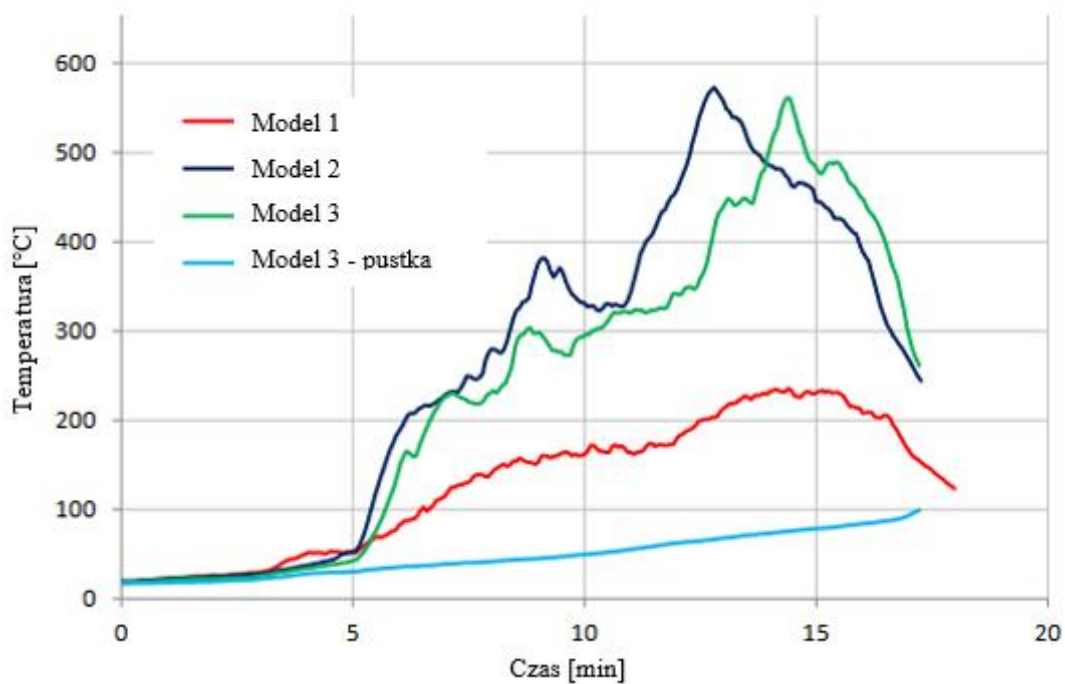
W termoparze zamontowanej na środku otworu okiennego na drugim piętrze różnice jeszcze bardziej uwydatniają się w zakresie przebiegu temperatur. Zmierzone temperatury zostały przedstawione na rysunku 3.23. Przestrzeń wentylacyjna zastosowana w modelu 3 umożliwia transport płomieni na wyższe wysokości badanego modelu przy wykorzystaniu efektu ciągu kominowego, co znacząco wpływa na ekspozycję ciepła na otwór okienny na drugim piętrze. Rozwój pożaru na tej wysokości odbywa się w późniejszej fazie – kiedy już transport płomieni oraz gorących gazów odbył się w sposób wystarczający do zajęcia się elewacji przez ogień. Różnice pomiędzy przebiegiem temperatur w modelach 1 i 2 są stosunkowo niewielkie, model 2 w stosunku do modelu 1 ma szybszy wzrost temperatury między 5'00'' a 7'00'' minutą, po czym temperatura stabilizuje się między w przedziale od 200°C do 250°C.

Na rysunkach 3.24, 3.25 i 3.26 przedstawiono wyniki przebiegu średniej temperatury czterech termopar (umiejscowionych osiowo względem pionowej osi symetrii otworu w odległości: 855 mm i 1355 mm) na następujących wysokościach: 2700 mm (wysokość górnego glistu otworu okiennego na pierwszej kondygnacji), 4200 mm (wysokość dolnego glistu otworu okiennego na drugiej kondygnacji), 5400 (wysokość górnego glistu otworu okiennego na drugiej kondygnacji). W przypadku modelu 1, bez zewnętrznej okładziny, rozwój pożaru jest najmniej intensywny w czasie. Zauważalne jest, iż temperatury na wszystkich wysokościach są podobne i wynoszą od około 100°C do ponad 200°C.

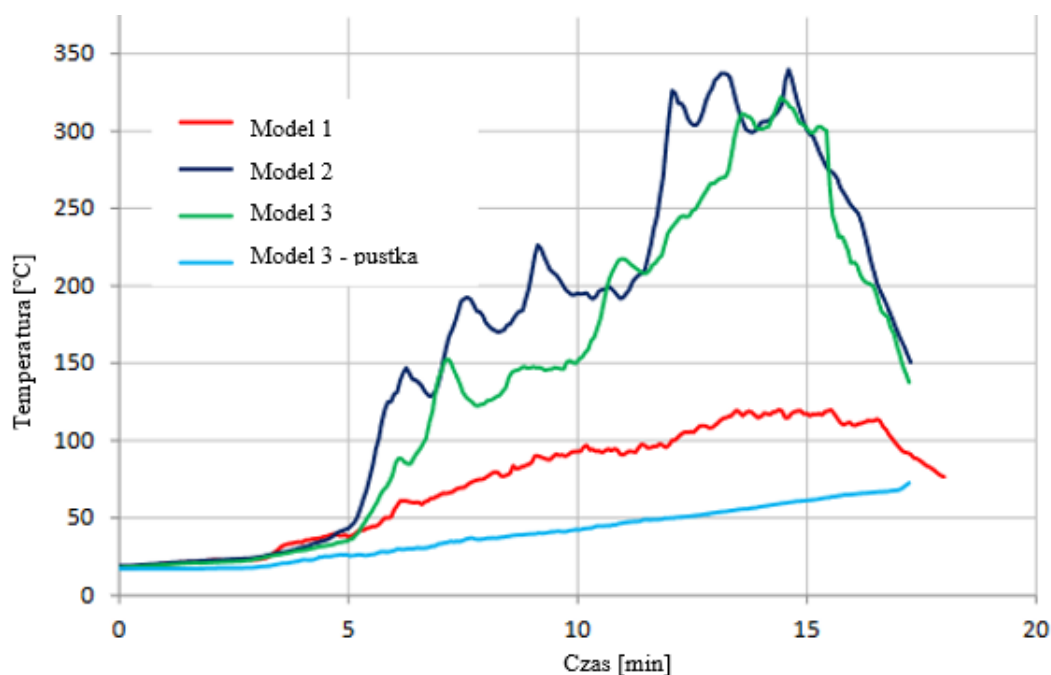
W przypadku temperatury średniej na wysokości 4200 i 5400 mm nad poziomem komory spalania różnica maksymalnych temperatur mieści się w granicy 5%. Temperatura na tej wysokości spowodowana jest jedynie unoszeniem się gorących gazów, płomień nie dosięgają tej wysokości. Model 2 i model 3 posiadają zbliżone maksymalne temperatury oraz przebieg na wysokościach 2700 mm oraz 4200 mm nad poziomem komory spalania. Wpływ przestrzeni wentylacyjnej znacząco zauważalny jest dopiero na wysokości 5400 mm. Potwierdza to, iż płomień w przestrzeni wentylacyjnej transportują się z mniejszymi temperaturami, lecz na dużo większą wysokość, co może powodować rozwój pożaru w kolejnych miejscach.



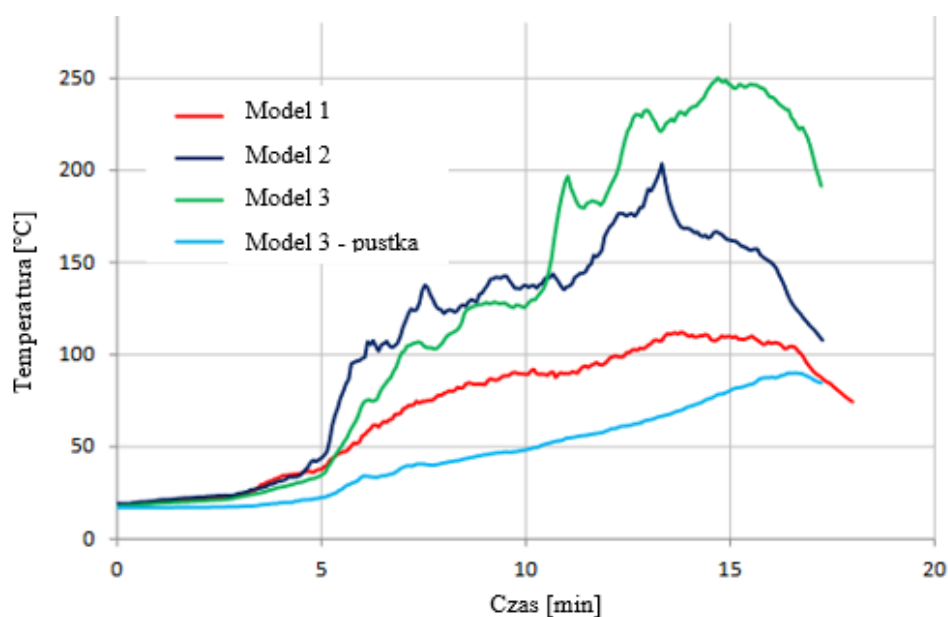
Rys. 3.23. Średnia temperatura mierzona termoparami na wysokości 2 piętra dla 3 modeli [21]



Rys. 3.24. Średnia temperatura mierzona termoparami na wysokości 2700 mm dla 3 modeli [21]



Rys. 3.25. Średnia temperatura mierzona termoparami na wysokości 4200 mm dla 3 modeli [21]

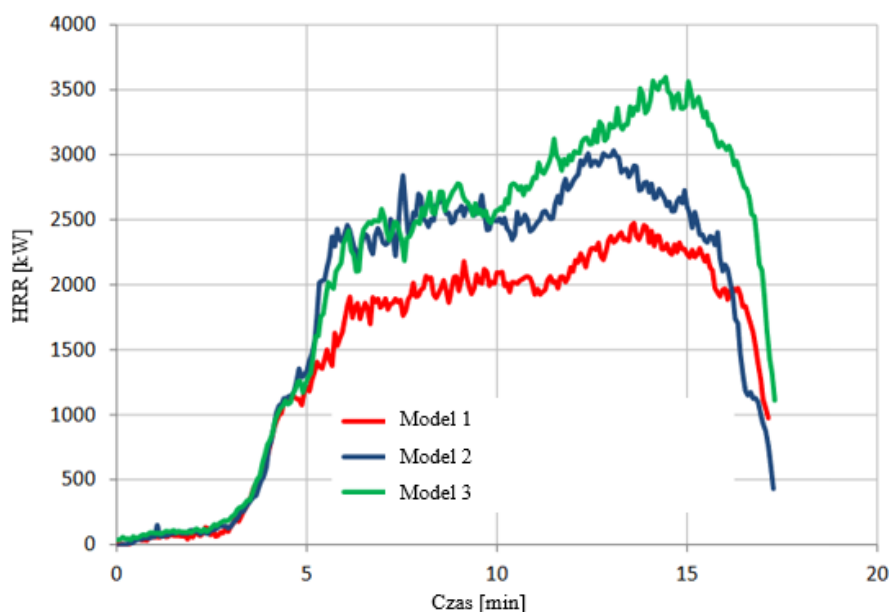


Rys. 3.26. Średnia temperatura mierzona termoparami na wysokości 5400 mm dla 3 modeli [21]

Pomimo niewielkiej dostępności literatury z zakresu badania wpływu przestrzeni wentylacyjnej na rozwój pożaru pozycje [21, 99] potwierdzają jej negatywny wpływ, tj. bardziej dynamiczny oraz powodujący większe straty pożar, szczególnie w późniejszych fazach. Przestrzeń wentylacyjna posiadająca małą szerokość, czyli od 20 do 50 mm, powoduje największy wpływ tzw. efektu ciągu kominowego. Pustka powietrzna pomimo zwiększenia niebezpieczeństwa rozwojem pożaru w innych strefach, zwiększenia wartości HRR tylko o około 15% [21]. Powoduje ona ponadto inne negatywne skutki m.in. dostęp wysokich temperatur z dwóch stron okładziny elewacyjnej oraz bezpośredni dostęp

ognia do podkonstrukcji. Efekt ciągu kominowego ma znaczący wpływ na szybkość i sposób transportu płomieni oraz gorących gazów do wyższych partii elewacji i działa na nie niszcząco, pomimo tego, że temperatury wewnątrz niej są tylko w przedziale 50 – 100°C.

Całkowita energia dla szybkości uwalniania ciepła (HRR), wyprodukowana podczas badania, dla modelu 1 wyniosła 1550 MJ, dla modelu 2 – 1870 MJ, dla modelu 3 – 2140 MJ, co jednoznacznie oznacza, iż przestrzeń wentylacyjna wskazuje za wzrost energii. Przebieg szybkości uwalniania ciepła dla wszystkich modeli przedstawiono na rysunku 3.27. Należy zauważyć, iż pomimo najniższej temperatury bezpośrednio nad komorą dla modelu 3 w przedziale początkowej fazy pożaru (5 – 15 min) model ten notuje najwyższe HRR, co wskazuje, iż duża część energii kumulowana jest w wyższych strefach.



**Rys. 3.27.** HRR dla wszystkich modeli [21]

Podsumowując, w przypadku analizy elewacji wentylowanej o różnego rodzaju okładzinach zewnętrznych nie jest miarodajna analiza oddziaływaniem wysoką temperaturą na okładzinę elewacyjną jedynie z jednej strony (zazwyczaj od strony zewnętrznej). Może to zaburzać oraz opóźniać wyczerpanie nośności tej okładziny, przez co w przypadku pożaru okładziny elementy elewacji wentylowanej mogą stanowić zagrożenie dużo wcześniej aniżeli wynikałoby to z badań oddziaływania lokalnego na próbkę wysoką temperaturą jedynie jednostronnie.

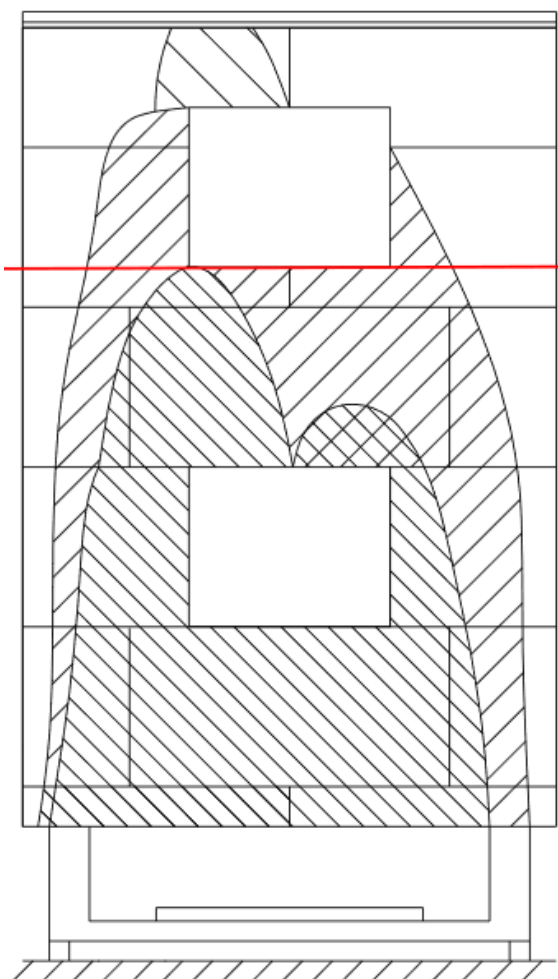
Należy ponadto zauważyć, iż są bardzo duże braki naukowe w rozpoznaniu wpływu efektu ciągu kominowego na rozwój pożaru na elewacjach wentylowanych, np. w przypadku materiałów niepalnych.





### 3.2.3 Odpadanie elementów elewacji wentylowanej

Jednym z najważniejszych wymogów, które budynek musi spełniać w przypadku pożaru, jest zapewnienia bezpiecznej ewakuacji osób przebywających w budynku i pracy zespołów ratowniczych. Kwestie związane z ryzykiem spadających części poddanej oddziaływaniu pożarem elewacji są znane badaczom na całym świecie. Choć środowiska naukowe są go świadome, w zakresie literatury naukowej problem ten jest niedostatecznie rozpoznany. Dowodem na to są naciski środowisk naukowych na postępowania poszczególnych rządów w krajach Unie Europejskiej w zakresie umiejscawiania odpowiednich zapisów w aktach prawnych oraz ujednolicania odpowiednich standardów badawczych. Na odpadanie części elementów z elewacji wentylowanej w warunkach pożaru ma wpływ szereg elementów i parametrów, w głównej mierze można je podzielić na parametry systemowo-materiałowe oraz mechanizmy rozwoju pożaru. W zakresie parametrów systemowo-materiałowych odpadanie można rozumieć poprzez m.in. sposób destrukcji materiałów pod wpływem oddziaływania pożaru, w przypadku płyt włóknisto-cementowych – pirolizę włókien w wysokich temperaturach lub zniszczenie matrycy cementowej, destrukcję podkonstrukcji, zniszczenie połączeń mechanicznych i adhezyjnych pomiędzy poszczególnymi komponentami systemu elewacji wentylowanej, np. zniszczenie nitów, które utrzymują okładziny zewnętrzne montowane do podkonstrukcji. Sulik i inni [87] wskazują, iż okładziny montowane mechanicznie w przeciwieństwie do rozwiązań montowanych adhezyjnie, które oparte są o kleje, zapewniają większą niezawodność oraz integralność systemu podczas oddziaływania wysokimi temperaturami. Integralność, którą zapewnia montaż mechaniczny, jest mniej wrażliwa na wysokie temperatury oraz zapobiega przez dłuższy czas odpadaniu elementów okładzin elewacyjnych w tychże warunkach.

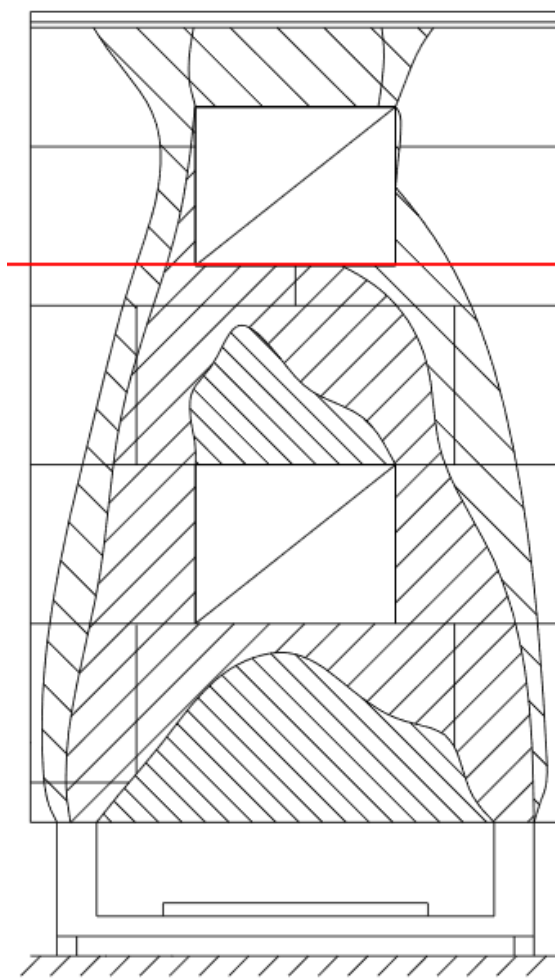
Odpadanie elementów elewacji podczas oddziaływania pożarem jest związane z destrukcją materiałów wchodzących w skład kompletnego systemu elewacji wentylowanej. Materiały te pod wpływem wysokich temperatur tracą swoje właściwości. Publikacja [21] przedstawia weryfikację stopnia destrukcji oraz ocenę wizualną okładziny zewnętrznej zastosowanej na dwóch modelach – model 2 jako standardowy system elewacji, model 3 jako elewacja wentylowana z przestrzenią wentylacyjną. W analizie okładziny elewacyjnej w modelach 2 i 3 widoczne są znaczące różnice, w przypadku modelu 3 zniszczenie okładziny była bardziej rozległa – spowodowane było to wpływem efektu kominowego w przestrzeni wentylacyjnej. Ponadto, od 10'00" minuty odczyty temperatury dla modelu 3 były niemalże dwa razy wyższe niż w modelu 2, co spowodowało dużo większe wartości szybkości uwalniania ciepła, co z kolei przełożyło się na stopień destrukcji okładziny zewnętrznej w tym modelu. Zakres stopnia modelu zniszczenia okładzin elewacyjnych przedstawiają rysunek 3.28 dla modelu 2 oraz rysunek 3.29 dla modelu 3.









-  Okładzina nietknięta
-  Powierzchnia okładziny została odbarwiona
-  Pow. okładziny są zwęglone i odbarwione
-  Okładziny są częściowo zwęglone

**Rys. 3.28.** Destrukcja okładziny zewnętrznej dla Modelu 2 [21]



-  Okładzina nietknięta
-  Okładziny są częściowo zwęglone
-  Okładziny są mocno zwęglone
-  Okładziny zniszczone

**Rys. 3.29.** Destrukcja okładziny zewnętrznej dla Modelu 3 [21]

Z uwagi na stosunkowo nowe rozwiązanie techniczne, jakim są elewacje wentylowane, występuje w nim szereg elementów i zjawisk jeszcze nieprzebadanych, m.in. jest to zakres modelu zniszczenia okładzin zewnętrznych i pozostałych elementów kompletnego systemu elewacji wentylowanej, a w konsekwencji odpadanie części elementów podczas występowania pożaru. Badania takie wykonuje się z wykorzystaniem modeli rzeczywistych elewacji bądź elewacji na budynkach modelowych. Częściowo badania można przenieść na modele numeryczne, lecz należy je poddać walidacji z badaniami wielkoskalowymi. Przeprowadzenie badań wielkoskalowych niesie za sobą bardzo duże koszty, co wpływa negatywnie na dostępność takich badań przez jednostki badawcze.

W większości przypadków takie badania realizowane są jedynie na zlecenie firm działających komercyjnie. Dopiero ostatnie lata, rozwój budownictwa zrównoważonego oraz zwiększone zainteresowanie krajów wysokorozwiniętych szeroko rozumianą zero-emisyjnością promuje takie rozwiązania techniczne elewacji, co w przyszłości prawdopodobnie pozwoli na lepsze ich rozpoznanie i przebadanie, również w zakresie bezpieczeństwa pożarowego. Niestety, problem ten w zakresie naukowym jest złożony (stosowanie różnych okładzin elewacyjnych oraz podkonstrukcji, indywidualne rozwiązania projektowane na potrzeby jednego budynku). Jak przedstawiono w punkcie 3.1.2, poszczególne kraje dostrzegają ten problem, a aktualnie jest wiele metod badawczych modeli rzeczywistych, które nakazują badanie parametru „odpadania elementów elewacji” podczas pożaru. Przypisują one również do sposobu badania sposób oraz parametry oceny odpadających elementów. Ponadto, ograniczenie odpadania elementów elewacji podczas pożaru na terenie Polski przywołuje rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [132]. Wymaga ono od projektantów, dostawców i wykonawców elewacji spełnienia odpowiednich wymagań w zakresie nieodpadania przez wymagany minimalnych czas.

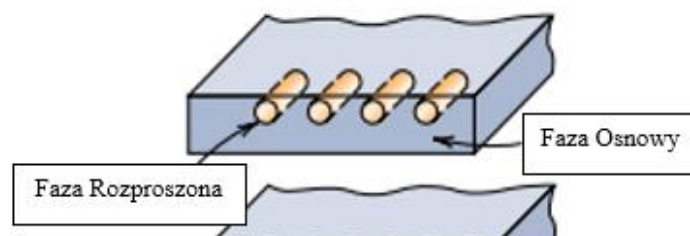
Autor pracy dostrzega znaczne luki w wiedzy naukowej w zakresie modelu zniszczenia okładzin elewacyjnych oraz pozostałych elementów kompletnego systemu elewacji wentylowanej, co w konsekwencji utrudnia prawidłowe projektowanie takich rozwiązań i prowadzi do odpadania części elementów podczas warunków występowania pożaru.

### **3.3 Podstawowe informacje o płytach włóknisto-cementowych**

Początki płyt kompozytowych wzmocnianych włóknami sięgają przełomu XIX i XX wieku, kiedy to Ludwik Hatschek opracował materiał nazywany popularnie eternitem. Płyty eternitowe miały szereg oczekiwanych parametrów – m.in. wysoką wytrzymałością na zginanie, odporność na działanie wilgoci, zarysowania i pękanie, niepalność oraz niewielki ciężar. Aż do lat 90. XX wieku płyty eternitowe były najpopularniejszym materiałem na pokrycia dachowe. Przestało tak być, kiedy udowodniono, iż włókna azbestowe znajdujące się w eternicie są szkodliwe dla zdrowia. W następstwie tych zdarzeń rozpoczęto produkcję płyt, które w składzie zawierają włókna bezpieczne, głównie celulozowe. Po rezygnacji z włókien azbestowych i zastąpieniu ich włóknami celulozowymi kompozyt ten stał się zupełnie innym wyrobem budowlanym, wpisującym się we współczesne zasady zrównoważonego rozwoju. W tym kompozycie zastosowanie znajdują również inne uzupełniacze – m.in. mączka wapienna, mika, perlit, mikrosfera czy kaolin. Aktualnie wiodącymi producentami włókno-cementu na skalę światową są firmy tj.: Cembrit, Allura, Equiton, Latonit, Swisspearl. Wyrastającym na jednego z czołowych producentów płyt włóknisto-cementowych jest polskie przedsiębiorstwo POZBRUK oferujące okładziny elewacyjne pod nazwą Scalamid. Sposób wytwarzania płyt włóknisto cementowych zależy jest od regionu jego wytwarzania. W Europie oraz w Ameryce Północnej i Ameryce Południowej wykorzystuje się głównie proces Hatschek’a. Z kolei

w rejonie Azji do wytwarzania płyt wykorzystuje się proces ekstruzji, który nazywany jest również procesem wyciskania płyt włóknisto-cementowych. W procesie produkcyjnym wewnątrz płyty mogą powstawać wady i uszkodzenia tj.: duże pory, rozwarstwienia (delaminacja), pęknięcia czy nierównomiernie rozłożone włókna. Podczas eksploatacji płyty włóknisto-cementowe narażone są na zmienne warunki środowiskowe tj.: oddziaływanie temperaturą – wysoką oraz niską, przejście przez temperaturę 0°C, oddziaływanie wilgotnościowe w cyklu dobowym (cykliczne zamrażanie – rozmrażanie), zagrożenie agresją chemiczną w postaci kwaśnych deszczów oraz agresywność fizyczną w postaci promieniowania ultrafioletowego.

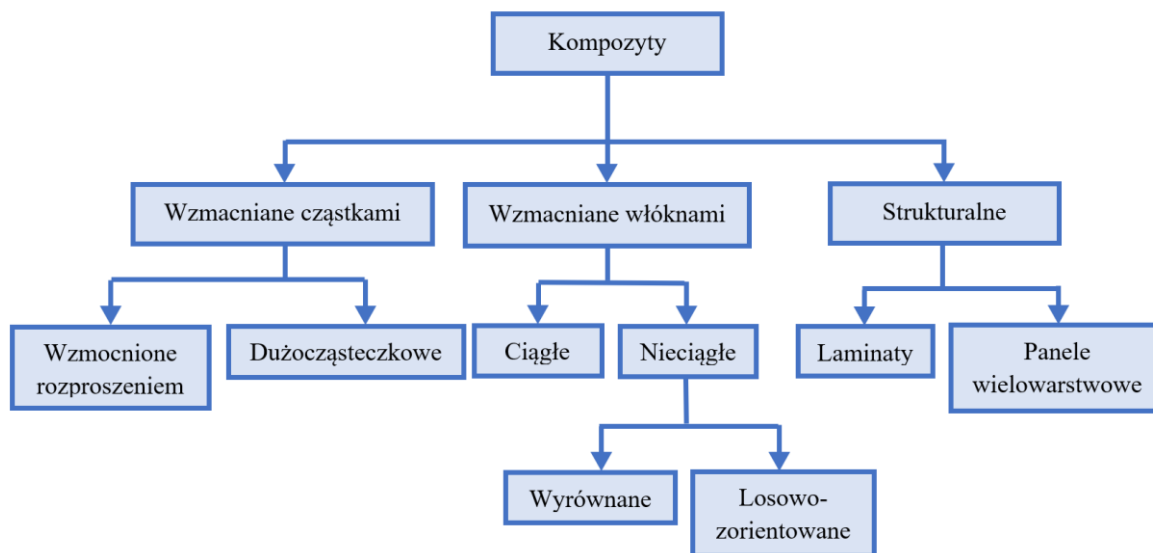
Płyty włóknisto-cementowe przypisywane są do kompozytowych materiałów budowlanych. Kompozyty jako oddzielną klasyfikację materiałów, rozpoczęto oznaczać w połowie XX wieku. Punktem zwrotnym była produkcja wielofazowych kompozytów, tj.: polimery wzmocnione włóknem szklanym, które znajdują zastosowanie przede wszystkim w inżynierii materiałowej, a w minimalnym stopniu w budownictwie. Nazwa kompozytu nie jest zbieżna z materiałami wielofazowymi, które znane były od tysięcy lat, tj.: drewno, cegły czy stopy wielofazowe stali. Uznanie nowatorskiej koncepcji łączenia różnych materiałów podczas produkcji doprowadziło do identyfikacji kompozytów jako nowej klasy, która była oddzielona od znanych metali, ceramiki i polimerów. Wielofazowa konstrukcja kompozytów stwarza ogromne możliwości projektowania materiałów o dużej kombinacji właściwości, które nie mogą być spełnione przez żadne z monolitycznych konwencjonalnych materiałów. Materiały te cały czas dają bodziec do rozwoju takich dziedzin jak: przemysł lotniczy, przemysł podwodny, bioinżynieria i transport, lecz znajdują one zastosowanie również w budownictwie. Podsumowując, za kompozyt uważany jest dowolny materiał wielofazowy wykazujący znaczną część właściwości obu faz składowych, który został sztucznie wykonany, ponadto fazy składowe muszą być chemicznie odmienne i oddzielone odrębnym interfejsem (z ang. *distinct interface*) [24]. Wiele materiałów kompozytowych składa się tylko z dwóch faz. Pierwsza to faza osnowy, która jest ciągła i otacza drugą fazę, która nazywana jest fazą rozproszoną (elementami wzmocniającymi). Schematyczny podział na dwie fazy przedstawiono na rysunku 3.30.



**Rys. 3.30.** Dwie fazy materiałów kompozytowych [24]

Materiały kompozytowe dzieli się na: wzmocniane cząstkami, wzmocniane włóknami oraz kompozyty strukturalne. Ponadto, istnieją co najmniej dwa podpodziały dla każdej z podgrup. Klasyfikacja materiałów kompozytowych została przedstawiona na rysunku 3.31. Faza rozproszona dla

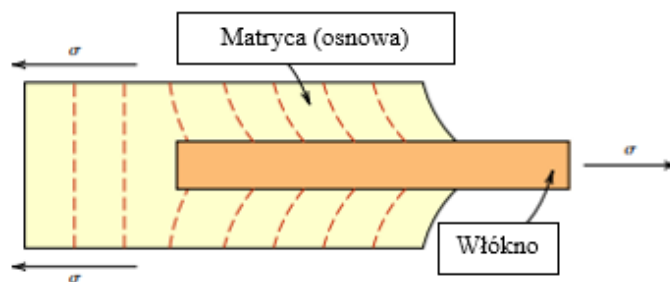
innych kategorii kompozytów posiada różne właściwości, np. dla kompozytów wzmocnionych cząstkami faza rozproszona jest w każdym kierunku równa (tzn. wymiary cząstek są w przybliżeniu takie same we wszystkich kierunkach). W przypadku kompozytów wzmacnianych włóknami faza rozproszona ma geometrię włókna (tj. duży stosunek długości do średnicy). Ostatnią podgrupą są kompozyty strukturalne, które są kombinacjami kompozytów i materiałów jednorodnych (tj. laminaty).



**Rys. 3.31.** Podział materiałów kompozytowych [24]

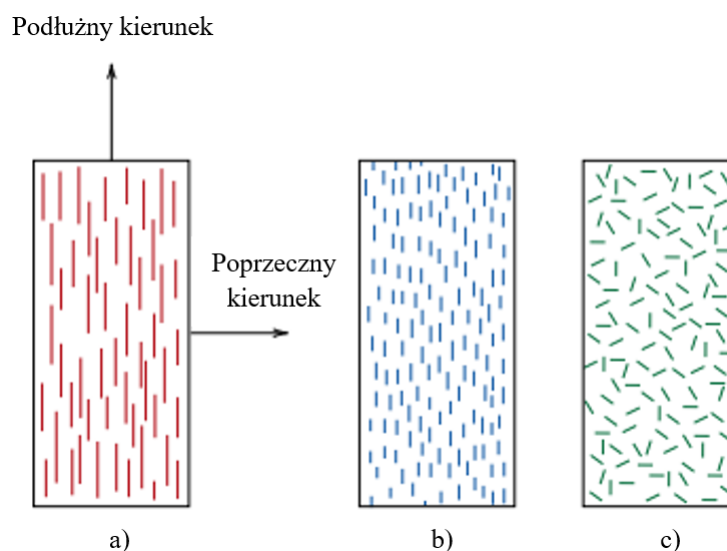
Kompozyty wzmocniane cząstkami dzieli się na wzmocnione rozproszeniem oraz dużo cząsteczkowe. W przypadku wzmocnionych rozproszeniem (rozproszenie kilkuprocentowe drobnych cząstek, zwykle o większej twardości i wytrzymałości np. w metalach), chodzi o wzmocnienie na etapie małych cząsteczek np. molekularnych, a w przypadku dużo cząsteczkowych o wzmocnienie większymi cząsteczkami (przykładem takiego kompozytu jest beton).

Pod względem technologicznym najważniejszymi kompozytami są takie, w których faza rozproszona ma postać włókien. Głównym celem projektowym kompozytów wzmocnionych włóknami jest zwiększenie ich wytrzymałości i/lub sztywności bez wzrostu wagi. Kompozyty wzmocniane włóknami o wyjątkowo wysokich wytrzymałościach wielokrotnie wykorzystują włókna o niskiej gęstości. Najważniejszym elementem zwiększającym ich wytrzymałość jest zastosowanie odpowiedniej długości włókien, nie za krótkich. Właściwości mechaniczne oraz wytrzymałościowe tych kompozytów zależą nie tylko od właściwości włókien, lecz również od stopnia, w jakim obciążenie jest przekazywane na włókna przez matrycę (osnowę). Sposób przekazywania przedstawiono na rysunku 3.32.



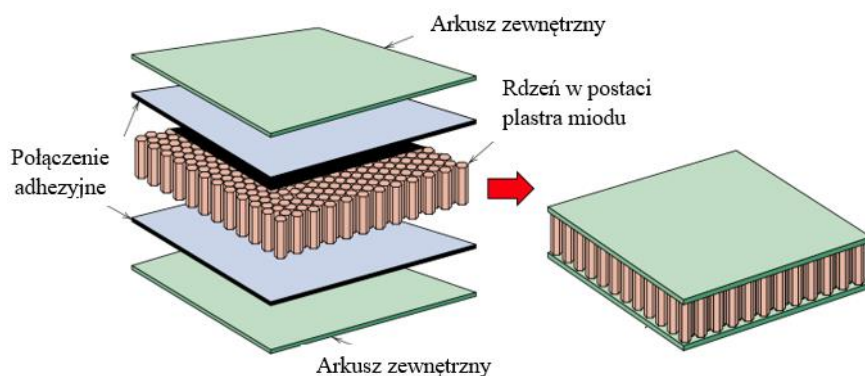
**Rys. 3.32.** Wzór deformacji w matrycy otaczającej włókna, które jest poddawane rozciąganiu [24]

Przykładami kompozytów wzmacnianych włóknami są płyty włóknisto-cementowe (a wcześniej również płyty eternitowe). Wielokrotnie, wraz ze wzrostem długości włókna, wzrasta wytrzymałość kompozytów. Na rysunku 3.33. przedstawiono różne możliwe rozkłady zbrojenia włóknami w matrycy.



**Rys. 3.33.** Schematyczne podziały kompozytów wzmacnianych włóknami: a) ciągłe i wyrównane; b) nieciągłe i wyrównane; c) nieciągłe i losowo zorientowane [24]

Ostatnią grupą kompozytów są kompozyty strukturalne składające się zarówno z materiałów jednorodnych, jak i z paneli wielowarstwowych, których właściwości zależą nie tylko od właściwości materiałów składowych, ale także od ich geometrycznej konstrukcji oraz sposobu ich zespolenia. Przykładami kompozytów strukturalnych są kompozyty laminarne i panele warstwowe (które są spotykane jako okładziny elewacyjne oraz okładziny ścian, w szczególności wykorzystuje się je w budownictwie przemysłowym). Na rysunku 3.34 przedstawiono schematycznie kompozyty strukturalne w postaci paneli warstwowych.



**Rys. 3.34.** Schemat przedstawiający kompozyt strukturalny o formie panelu warstwowego z rdzeniem o strukturze plastra miodu [24]

### 3.3.1 Charakterystyka płyt włóknisto-cementowych

Płyty włóknisto-cementowe scharakteryzowane zostały w kilku normach w zależności od kształtu i zastosowania. Rozróżnia się dwa główne sposoby zastosowania płyt włóknisto-cementowych: do zastosowań wewnętrznych i zewnętrznych. Z kolei normy klasyfikują te materiały kompozytowe w zastosowaniu jako: płyty płaskie do zastosowań zewnętrznych i wewnętrznych na ścianach i sufitach (norma PN-EN 12467 [114]), płyty faldiste przeznaczone na pokrycia dachowe oraz okładziny wykończeniowe ścienne i sufity (norma PN-EN 494 PN [121]), płytki włóknisto-cementowe z przeznaczeniem na pokrycia dachowe i wykończenia ścian i stropów wewnętrznych i zewnętrznych układane na zakład (norma PN-EN 492 [120]).

Płaskie płyty włóknisto-cementowe w normie [114] podzielono na cztery kategorie w zależności od ich odporności na warunki atmosferyczne oraz na pięć klas w zależności od wytrzymałości na zginanie, w tym na dwie grupy rozmiarów ze względu na sposób montażu oraz na dwa poziomy tolerancji wymiarów. Kategorie odporności wraz z opisem warunków, na jakie mogą być narażone płyty, przedstawiono w tabeli 3.16.

**Tabela 3.16.** Kategorie odporności na warunki atmosferyczne płyt włóknisto-cementowych [114]

Kategoria odporności	Opis warunków
A	Płyty narażone na niskie i wysokie temperatury oraz wysoką wilgotność
B	Płyty narażone na wysokie temperatury i wilgotność, tylko okresowo niskie temperatury
C	Płyty narażone na wysokie temperatury i wilgotność, tylko brak niskich temperatur. Zastosowanie do wewnątrz
D	Przeznaczone do wykonywania sztywnych podłoży

Ze względu na wymiary wyróżnia się dwie grupy płyt – małe i duże. Norma PN-EN 12467 [114] definiuje nazwę płyty małej, jaką taką, która posiada powierzchnię do 0,4 m<sup>2</sup> oraz stosunek długości do szerokości mniejszy od trzech. Z kolei płyty duże klasyfikuje jako wszystkie nieobjęte w definicji płyt małych. Ponadto, dla płyt włóknisto-cementowych określono dwa poziomy tolerancji dla długości, szerokości, grubości, prostoliniowości i prostokątności krawędzi. Płyty powinny spełniać wymagania odpowiedniego poziomu tolerancji w zakresie wszystkich parametrów. Długość i szerokość powinny być zadeklarowane przez producentów. Typowe handlowe wymiary płyt włóknisto-cementowych to 3050 × 1250 mm<sup>2</sup>. Grubość płyt wynosi od 3 mm do 30 mm, a najpopularniejsza to 8 mm. Podział na klasy według [114] określono w odniesieniu do deklarowanej minimalnej wytrzymałości płyt włóknisto-cementowych na zginanie *MOR* (z ang. *modulus of repture*) wyrażonej w MPa, co przedstawiono w tabeli 3.17. Wytrzymałość *MOR* zgodnie z normą [114] powinna być średnią wartością z otrzymanych badań w obu kierunkach. Należy dodać, iż wytrzymałość w najslabszym kierunku nie może być mniejsza niż 70% wartości średniej z obu kierunków.

**Tabela 3.17.** Klasy płyt włóknisto-cementowych i ich minimalne wytrzymałości *MOR* [114]

Minimalna wytrzymałość na zginanie <i>MOR</i> określana na mokro [MPa]		Minimalna wytrzymałość na zginanie <i>MOR</i> określana na sucho [MPa]	
Klasa	Kategoria A i B	Klasa	Kategoria C i D
1	4	1	4
2	7	2	7
3	13	3	10
4	18	4	16
5	24	5	22

Norma [114] wskazuje ponadto minimalne wymagania, które powinny spełniać płyty dla danej kategorii, lecz producenci materiałów włóknisto-cementowych przedstawiają dodatkowe, pozanormowe parametry charakteryzujące płyty i ich właściwości. Są to m.in.: parametry rozszerzalności pod wpływem temperatury, przewodność cieplna, nasiąkliwość oraz porowatość. Przykładowe parametry zawarte w kartach technicznych płaskich płyt włóknisto-cementowych do zastosowań zewnętrznych przedstawiono w tabeli 3.18.

**Tabela 3.18.** Przykładowe dane techniczne deklarowane przez producentów płyt włóknisto-cementowych płaskich do zastosowań zewnętrznych [60-62]

Wymiar	jedn.	Wartość
Szerokość	mm	1250
Długość	mm	3050
Grubość	mm	8,1
<b>Właściwości fizyczne</b>		
Gęstość suchego produkt	g/cm <sup>3</sup>	1,58
Waga	kg/m <sup>2</sup>	14,9
<b>Właściwości mechaniczne – współczynnik elastyczności przy zginaniu</b>		
Moduł elastyczności suchego produktu prostopadle do włókien	GPa	12
Moduł elastyczności suchego produktu równolegle do włókien	GPa	10
<b>Wytrzymałość na zginanie</b>		
Badanie prostopadle do włókien	MPa	32
Badanie równolegle do włókien	MPa	22
<b>Właściwości termiczne</b>		
Przewodnictwo cieplne	W/m·K	0,390
Rozszerzalność termiczna	mm/m·K	< 0,01
Odporność na cykle zamrażania/rozmarzania	cykle	> 100
<b>Właściwości cieplno-wilgotnościowe</b>		
Rozszerzalność wilgotnościowa	mm/m	1,6
<b>Tolerancje</b>		
Grubość	mm	±0,5
Długość, szerokość	mm	±3,0
<b>Inne właściwości</b>		
Kategoria, klasa	EN-12467	NT A3 I
Odporność ogniowa	EN 1350	A2, s1 –d0

### 3.3.2 Skład płyt włóknisto-cementowych

Płyty włóknisto-cementowe, jako materiały kompozytowe wzmacniane włóknami, charakteryzują się dwoma fazami [24] – fazą matrycy, czyli osnowy w przypadku tych płyt jest to matryca cementowa, oparta o cement portlandzki i fazą rozproszoną w postaci włókien. Poza cementem portlandzkim w matrycy znajdują się dodatkowe składniki oraz wypełniacze tj.: mączka wapienna,



mika, perlit, kaolin oraz mikrosfera. Faza rozproszona charakteryzuje się rozkładem włókien w sposób nieciągły i losowo zorientowany. Włókna, które są stosowane w produkcji tych kompozytów, to włókna celulozowe (z ang. *cellulose*), włókna syntetyczne PVA (polialkohol winylu z ang. *Poly (vinyl alcohol)*) i włókna PP (polipropylenowe z ang. *polypropylene fiber*). Receptury płyt włóknisto-cementowych poszczególnych producentów, zostały opracowane na podstawie wieloletnich badań i stanowią obecnie *know-how* tych firm. Przykładową recepturę płyt włóknisto-cementowych [136], przedstawiono w tabeli 3.19.

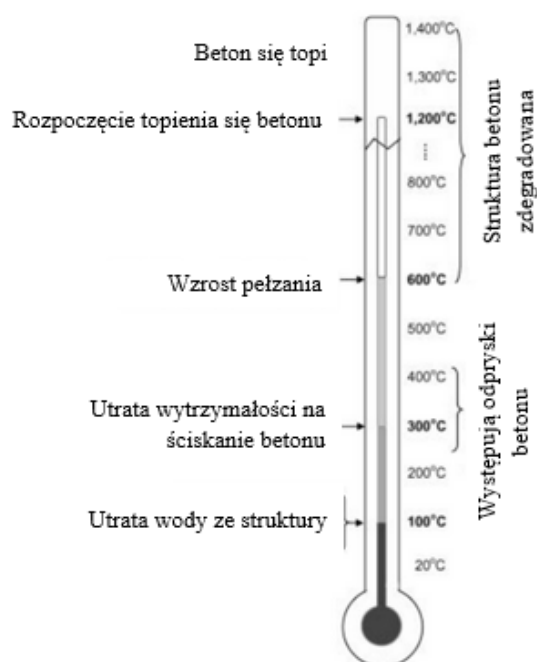
**Tabela 3.19.** Przykładowa receptura płyt włóknisto-cementowych [136]

Podstawowe składniki	Udział [%]
Cement portlandzki	60%
Celuloza	8%
Włókna syntetyczne (PVA)	2%
Mączka wapienna	30%
Dodatki	ilość
Plastyfikatory	0.1 l/t
Chlorek didecyldimetyloamoniowy	0.1 l/t
Perlit	1 kg/t
Mika	1 kg/t
Mikrosfera	1 kg/t
Środek hydrofobizujący	-

### 3.3.2.1. Faza matrycy cementowej płyt włóknisto-cementowych

Faza matrycy w płytach włóknisto-cementowych opiera się o zastosowanie cementu portlandzkiego, który dobrze znosi wysokie temperatury. Podczas hydratacji cementu portlandzkiego głównymi produktami są uwodnione krzemiany wapnia (faza C-S-H) i gliniany oraz siarczanogliniany wapnia. Hydratacja cementu to więc nic innego jak uwodnienie – ogół procesów fizycznych i chemicznych (obejmujący rozpuszczanie, reakcje hydratacji i hydrolizy), przebiegający na skutek łączenia wody z cementem, a następnie utworzeniem produktów reakcji. Niezbędna ilość wody do pełnej hydratacji cementu waha się od 20 do 25% jego masy. W przypadku oddziaływania wysokimi temperaturami na matrycę cementową wykonaną z cementu portlandzkiego można wyróżnić kilka faz jej destrukcji. Pierwszą fazą jest parowanie wolnej wody następuje to w temperaturze 105°C, wtedy nie tylko spada wytrzymałość tej fazy, lecz również wzrasta ciśnienie parów w matrycy. W przypadku betonów opartych o cement portlandzki w temperaturze ok 300°C, chemicznie związana woda zaczyna parować, co z kolei zmniejsza wytrzymałość materiału na ściskanie [158]. Faza wzrostu pełzania w betonach odbywa się w temperaturach do 600°C [158, 168] i powiązana jest z rozkładem

wodorotlenku wapnia (fazy C-H), tworzących b-C2S [52]. W przypadku płyt włóknisto-cementowych faza ta odpowiada końcowej destrukcji. W betonowych elementach przestrzennych topnienie materiału rozpoczyna się w temperaturach 1200°C. Poszczególne fazy zachowania się fizykochemicznych procesów w betonach z matrycą wykonaną z cementu portlandzkiego przedstawiono na rysunku 3.35.



**Rys. 3.35.** Poszczególne fizykochemiczne procesy następujące podczas ogrzewania w betonach opartych o cement portlandzki [x158]

### 3.3.2.2. Faza rozproszona płyt włóknisto-cementowych

Faza rozproszona płyt włóknisto-cementowych zazwyczaj składa się z włókien celulozowych, włókien PVA (polialkohol winylu) i włókien PP (polipropylenowe). Każdy rodzaj włókien w płytach włóknisto-cementowych spełnia określone zadania, a proporcje ich u każdego producenta są inne.

Włókna celulozowe są powszechnie stosowane w kompozytach oraz stanowią najliczniejszą organiczną grupę, wykonane są głównie z estrów celulozy. Włókna celulozowe mogą zostać wytworzone z drewna, kory, liści roślin rolniczych bądź z innego materiału roślinnego. Drewno jest głównym źródłem włókien celulozowych dla przemysłu. W tabeli 3.20 przedstawiono produkcję roczną włókien celulozowych na świecie.

Włókna celulozowe posiadają szereg zalet m.in.: niską gęstość właściwą, biodegradowalny charakter, niską cenę. Właściwości te pozwalają wykorzystywać je do zbrojenia matrycy cementowej. Inne parametry fizyczne, tj. moduł sprężystości czy wytrzymałość na rozciąganie, zależą od tego, z jakiego materiału są wytworzone. W tabeli 3.21 przedstawiono przykładowe parametry fizyczne włókien celulozowych wytworzonych z materiałów różnego pochodzenia.

**Tabela 3.20.** Produkcja włókien pochodzenia celulozowego dla przemysłu na świecie [159]

Włókno	Światowa produkcja roczna (10 <sup>3</sup> ton)	Pochodzenie
Drewno	1 750 000	łodyga/rdzeń
Bambus	10 000	łodyga/rdzeń
Bawełna	18 450	owoce
Juty	2 300	łodyga/rdzeń
Ketmia konopiwata	970	łodyga/rdzeń
Len	830	łodyga/rdzeń
Sizal	378	liście
Konopie	214	łodyga/rdzeń
Włókno kokosowe	100	owoce
Szczmiel biały	100	łodyga/rdzeń

**Tabela 3.21.** Produkcja włókien pochodzenia celulozowego dla przemysłu na świecie [101]

Włókno	Gęstość (g/cm <sup>3</sup> )	Średnica (μm)	Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	Moduł sprężystości (GPa)	Wydłużenie przy zerwaniu (%)
<b>ŁYKO</b>					
Juty	1,3-1,45	25-200	393-773	13-26,5	1.16-2.0
Len	1,5	10-25	345-1 100	27,6	2,7-3,2
Konopie	1,5	25-35	69,	15-23	1,6
Szczmiel biały	1,5	10-25	400-938	61,4-128	1,2-3,8
<b>LIŚCIE</b>					
Sizal	1,45	50-200	350-640	9,4-22	3-7
Liście ananasa	1,5	20-80	413-1627	4,2-82,5	1,6-4
<b>NASIONA</b>					
Bawełna	1,5-1,6	10-20	287-800	5,5-12,6	7-8
<b>OWOCE</b>					
Włókno kokosowe	1,15	100-450	131-175	4-6	15-40
Bawełna	1,5-1,6	10-20	287-800	5,5-12,6	7-8
<b>DREWNO</b>					
Drewno	0,6-1,1	20-40	980-1770	10-80	1-4
<b>SYNTECYCZNE</b>					
Włókno szklane (E-glass)	2,5	8-15	2000-3500	70	2,5
Aramidowe	1,4	15	3000-3450	63-67	3,3-3,7
Węglowe	1,7	5-100	2400-4000	230-400	1,4-1,8

Kolejnymi włóknami, które są używane w płytach włóknisto cementowych, są włókna PVA (polialkohol winylu) i włókna PP (polipropylenowe). Polialkohol winylowy to biodegradowalny polimer otrzymywany z monomerów winylowych. Głównym zastosowaniem włókien PVA jest wzmocnienie materiałów opartych o cement ze względu na ich dobre właściwości mechaniczne oraz silną interakcję z matrycą cementową. Włókna PVA posiadają wysoką wytrzymałość na rozciąganie oraz wysoki moduł sprężystości. Charakteryzują się również dużą odpornością na wilgoć, odpornością na czynniki alkaliczne (w przeciwieństwie do włókien celulozowych) oraz posiadają dobrą przyczepność do matrycy cementowej [128]. Jak wykazano w pracy [17], włókna PVA posiadają lepsze właściwości mechaniczne, lepszą przyczepność do matrycy cementowej, a co najważniejsze – tworzą jednorodny rozkład w matrycy w porównaniu z włóknami PP. Parametry wytrzymałościowe i materiałowe dla włókien PVA i PP przedstawiono w tabeli 3.22 [53].

Będąc połączeniem dobrej przyczepności do matrycy cementowej, wysokiej wytrzymałości na rozciąganie oraz dobrego modułu sprężystości, włókna PVA są bardzo często stosowane w materiałach kompozytowych jako uzupełnienie włókien celulozowych. Włókna syntetyczne stosowane są zwłaszcza w produkcji płyt zewnętrznych dla zwiększenia ich trwałości i wytrzymałości [30]. Zazwyczaj ich udział w płycie zawiera się poniżej dwóch procent [128]. W przypadku włókien syntetycznych PVA (polialkohol winylu) punkt topnienia to około 200°C.

Włókna PP (polipropylenowe) charakteryzują się temperaturą topnienia w przedziale 160 – 170°C. Niektóre badania pokazują również wyższy punkt topnienia – w przedziale 190 – 250°C [84]. Ponadto, ich temperatura zeszklenia jest na poziomie około -18°C (przejście materiałów z twardego i stosunkowo kruchego „szklatego” stanu do stanu przypominającego bardziej stan gumy miękkiej i elastycznej).

**Tabela 3.22.** Parametry włókien stosowanych do wzmacniania matrycy cementowej [53]

Rodzaj włókna	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości [MPa]	Wydłużalność włókien [%]	Gęstość [t/m <sup>3</sup> ]	Uwagi
Włókna PVA	880 – 1600	25 – 40	6 – 10	1,30	-
Włókna PP	600	5	25	0,91	Unoszą się na wodzie
Włókna Nylonowe	750 – 900	3,4 – 4,9	13 – 25	1,10	-
Włókna Polietylenowe	250 – 700	1,4 – 2,2	10 – 15	0,95	-
Wysokowydajne włókno polietylenowe	2700	120	5	0,97	Wysoka cena
Włókna stalowe	1200	200	3 – 4	7,85	Ciężkie, rdzewieją
Włókna szklane AR	2200	80	0 – 4	2,78	Słabe w alkaliach
Włókna azbestowe	620	160	-	2,55	Niebezpieczne dla zdrowia

Dodawanie włókien do materiałów cementowych lub betonowych daje pozytywne właściwości, m.in. wzmacnia wytrzymałość tych kompozytów w warunkach pożarowych [4, 10-13, 38]. Mechanizm działania włókien w materiałach kompozytowych podczas pożaru zakłada, że w podwyższonej temperaturze (powyżej 160°C) włókna uzyskują stan przypominający gumę, a następnie topią się, co prowadzi do zmniejszenia objętości poszczególnych włókien. Powstałe pustki po włóknach formują kanaliki, którymi wydostaje się pod wysokim ciśnieniem para wodna, dzięki temu naprężenia wewnętrzne nie osiągają punktu krytycznego, lecz pozostają puste przestrzenie, które znacząco osłabiają ten kompozyt.

### 3.3.3 Destrukcja płyt włóknisto-cementowych pod wpływem wysokich temperatur

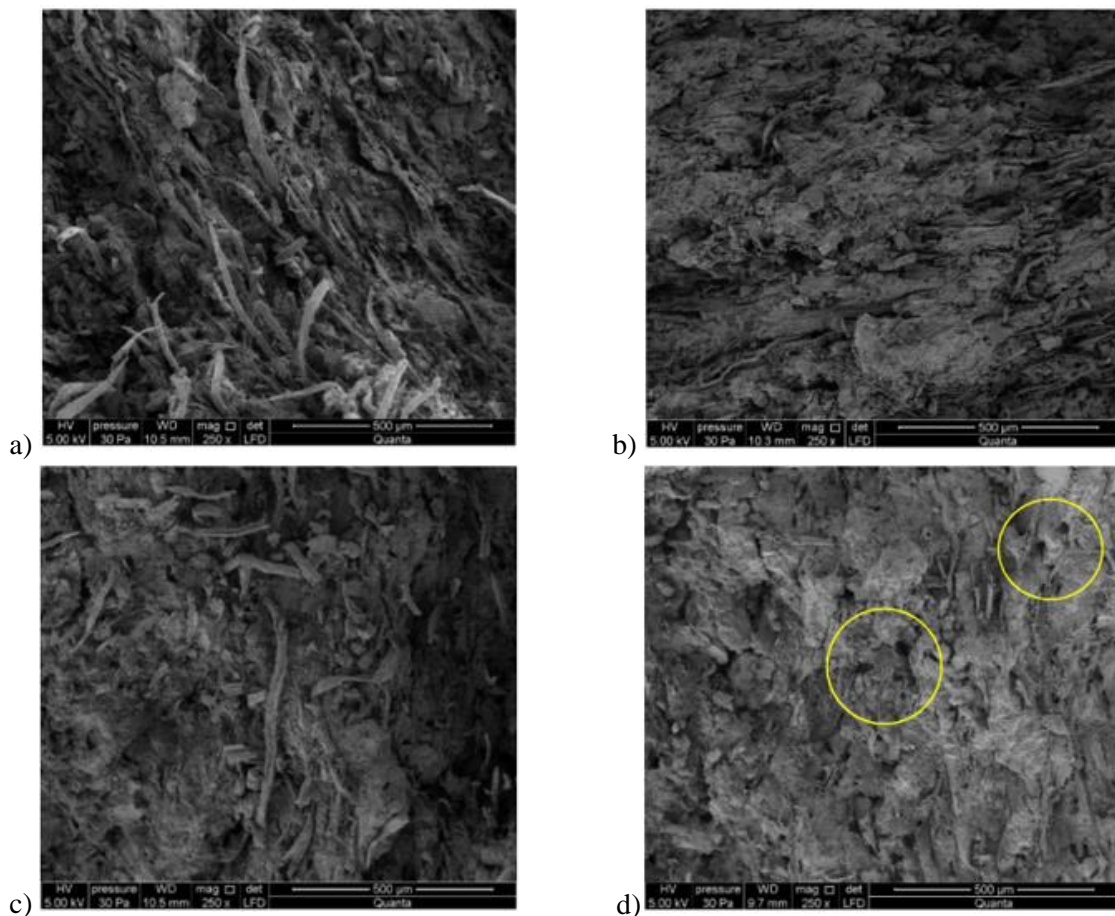
Model zniszczenia płyt włóknisto-cementowych w oddziaływaniu wysokimi temperaturami (pożarowymi) można analizować jako sposób zniszczenia poszczególnych faz tego kompozytu. Jak przedstawiono powyżej, pierwszą fazą ulegającą zniszczeniu jest faza rozproszona, która zapewnia w głównej mierze wytrzymałość na zginanie i rozciąganie płyt. W zależności od zastosowanych włókien: naturalne (celulozowe) czy syntetyczne (PVA i PP), topnienie rozpoczyna się w temperaturach już od około 160°C. Punkt topnienia wskazują, iż włókna celulozowe szybciej ulegają destrukcji pod wpływem temperatur pożarowych. Przy temperaturze 105°C, wolna woda w fazie matrycy zaczyna parować. Temperatury z przedziału od 80°C do 150°C powodują odwodnienie ettringitu, a temperatury 150°C a 170°C odwodnienie gipsu [52]. W temperaturze ok 300°C chemicznie związana woda zaczyna parować, co z kolei zmniejsza wytrzymałość materiału na ściskanie. Rozkład portlandytu następuje w temperaturze pomiędzy 400°C a 540°C. Kiedy temperatura wzrasta powyżej 400°C, wytrzymałość matrycy cementowej szybko spada i w konsekwencji rozpada się z powodu uwodnionych krzemianów wapnia (C-S-H), tworzących b-C2S [52].

Płyty włóknisto-cementowe posiadają bardzo mały trzeci wymiar („grubość”), wobec czego temperatura bardzo szybko przenika przez jej cały wymiar poprzeczny i powoduje bardzo duże naprężenia, nie tylko na warstwach wierzchnich płyt, lecz również wewnątrz.

Destrukcja płyt włóknisto-cementowych zależna jest od kilku czynników. W pracy [161], analizując stopień destrukcji, autor oddziaływał temperaturami tj. 230°C i 400°C. Badania Szymkowska [161] przedstawiają, że w temperaturze 230°C po 3 godzinach włókna występujące w płytach włóknisto-cementowych ulegają całkowitej destrukcji. Po tym czasie nie występują żadne rozpoznane zdarzenia emisji akustycznej, które towarzyszą pękaniu włókien. Zniszczenie próbek w tym przypadku następuje przez kruche, wysokoenergetyczne pęknięcie. Temperatury te odpowiadają dehydratacji fazy C-S-H, co przy długim czasie oddziaływania może spowodować duże ciśnienie wewnątrz płyt, co z kolei znacząco ułatwia zniszczenie jej. Na rysunku 3.36 a) i c) przedstawiono próbki płyt włóknisto-cementowych przed badaniem przy wykorzystaniu skaningowego mikroskopu elektronowego. Próbki przedstawione na rysunku 3.36 b) i d), przedstawiają wcześniejsze przywołane próbki płyt włóknisto-cementowych po

trzygodzinnym oddziaływaniu temperatury 230°C. Zauważalna jest struktura drobno-porowata o wielkości porów do 50 µm. Widoczne są kawerny oraz wyżłobienia w miejscu przelamu po wyrwanych włóknach o szerokości do 500 µm. Występują różne formy uwodnionych krzemianów wapnia typu C-S-H, przeważa faza „bezpostaciowa” oraz zbudowana z silnie przylegających cząstek.

Kolejno Szymków [161] poddał płyty włóknisto-cementowe wpływom temperatury 400°C. Początkowo wytrzymałość na zginanie *MOR* płyt wzrasta w przedziale od 3 do 20%. Krótkotrwałe oddziaływanie temperatury 400°C w wyniku działania ognia dla płyt prowadzi do zwiększenia otrzymanych wyników wytrzymałości na zginanie *MOR*. Kolejno podczas wydłużenia czasu oddziaływania temperatury 400°C następuje usztywnienie struktury płyty włóknisto-cementowej i zwiększenie jej kruchości, co powoduje zmniejszenie wytrzymałości na zginanie *MOR*. Potwierdzić to może fakt, iż w wysokiej temperaturze – około 400°C w początkowej fazie następuje wysuszenie próbki, co powoduje zwiększenie wytrzymałości płyty i aktywności akustycznej rejestrowanych zdarzeń podczas zginania. Wpływ 400°C w tak krótkim czasie okazał się bardziej krytyczny dla płyt włóknisto-cementowych aniżeli 230°C przez znacznie dłuższy czas oddziaływania. Autor wskazuje, iż pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury 400°C przez 15 minut uległy destrukcji nie tylko zawarte włókna, ale również matryca cementowa.



**Rys. 3.36.** Przekrój powierzchni płyt włóknisto-cementowych: a) seria A – przed badaniem; b) seria A – po badaniu; c) seria D – przed badaniem; d) seria D – po badaniu [161]

Należy zauważyć, iż temperatura 400°C jest również skorelowana z rozkładem wodorotlenku wapnia (fazy C-S-H) [158, 168], co powoduje zwiększenie ciśnienia wewnątrz struktury matrycy cementowej, a jej zniszczenie powoduje wysokoenergetyczne zniszczenie próbek. Można przyjąć za zasadne, iż początek rozkładu wodorotlenku wapnia, czyli temperatury z zakresu około 400°C, stanowi stopień krytycznego zniszczenia płyt włóknisto- cementowych.

### **3.4 Podsumowanie analizy literatury przedmiotu**

W analizie literatury przedmiotu przedstawiono przegląd wymagań formalnych stawiany płytom włóknisto-cementowym oraz elewacjom wentylowanym w zakresie warunków pożaru. Przywołano definicję elewacji wentylowanej, precyzując kompletnego systemu elewacji wentylowanej, który jest określony przez dwa dokumenty wydane przez Komisję Europejską – EAD 090062-00-0404 [39] oraz ETAG 034-1 [40]. Powyższe dokumenty, poza definicją elewacji wentylowanej, przedstawiają wymagania z zakresu bezpieczeństwa i użyteczności całego systemu, ale – co istotne – nie precyzują wymagań dla poszczególnych elementów oraz ich oceny. Kolejno przedstawiono wymagania prawne z zakresu bezpieczeństwa pożarowego obowiązujące w Polsce dla elewacji, w tym Rozporządzenie WT [132]. Rozporządzenie to przedstawia wymagania m.in. z zakresu uniemożliwienia odpadania części elementów elewacji oraz stosowania wyrobów o określonej klasie reakcji na ogień. Przywołano wszystkie wymagania dot. oceny klasyfikacji palności poszczególnych elementów i sposób ich oceny. Pomimo określonych wymagań dla kompletnych systemów elewacji wentylowanej brak jest metodyki badania w zakresie uniemożliwienia odpadania elementów elewacji podczas pożaru. Wobec powyższego przeanalizowano metodykę badania i sposób oceny elewacji wentylowanych z wykorzystaniem modeli wielkoskalowych na świecie. W modelach wielkoskalowych wyróżnia się modele rzeczywiste elewacji, które są specjalną platformą badawczą przygotowaną do badań oraz oceny elewacji w warunkach pożaru oraz elewacje na budynkach modelowych, które są specjalnie przygotowanymi budynkami w całości na potrzeby badania. Modele rzeczywiste elewacji jako platformy do oceny elewacji są systemem dużo częściej stosowanym, niestety brak jest jego normalizacji w zakresie zarówno Polski, Europy jak i świata. W każdym kraju obowiązują inne standardy, które przedstawiają wymagania dla modeli rzeczywistych. Komisja Europejska również zauważyła ten problem i podjęła stosowne działania (dokumenty [19, 42]). W zakresie wymagań formalnych stawianych dla poszczególnych elementów elewacji wentylowanych dużym problemem jest brak jednolitego badania dla wszystkich krajów w zakresie oceny systemów elewacji.

Kolejno analizowano temat bezpieczeństwa pożarowego oraz problematyki pożarów i efektów pożarów występujących w elewacjach wentylowanych. Jest to zagadnienie z zakresu wiedzy interdyscyplinarnej łączącej m.in. inżynierię materiałową, inżynierię pożarową, inżynierię lądową w zakresie projektowym oraz w zakresie technologii realizacji, fizykę, chemię i inne. W pracy zdefiniowano określenie bezpieczeństwa pożarowego, które nie jest zdefiniowane nigdzie w aktach

prawnych. Następnie dokonano przeglądu literatury i stanu wiedzy w zakresie problematyki i niekorzystnych efektów występujących w warunkach pożaru elewacji wentylowanych, a mianowicie:

- rozprzestrzeniania się pożaru pomiędzy kondygnacjami po elewacji;
- efekt ciągu kominowego;
- odpadania elementów elewacji wentylowanych (w tym okładzin) w warunkach pożaru.

Analizując problematykę z zakresu pożarów występujących w elewacjach wentylowanych i ich wpływ na bezpieczeństwo, szczególną uwagę zwracają tu duże braki w literaturze naukowej. Do dziś naukowcy nie określili korelacji efektu ciągu kominowego w zależności od stosowanych okładzin oraz zmniejszenia wpływu efektu ciągu kominowego wraz z rozwojem pożaru. W literaturze naukowej brak jest również opisanego wpływu wiatru i wilgotności powietrza na efekt mechanizmu przeskoku ognia pomiędzy kondygnacjami. Ponadto znajdują się wyłącznie wybiórcze informacje na temat problematyki destrukcji elewacji wentylowanej w warunkach pożaru, a w jej konsekwencji odpadania okładzin elewacyjnych oraz pozostałych elementów systemu.

Kolejno w pracy dokonano analizy literatury przedmiotu w zakresie płyt włóknisto-cementowych. Opiszano wyrób budowlany, jakim są płyty włóknisto-cementowe i ich klasyfikację do kompozytów wzmacnianych włóknami. Przeanalizowano również skład płyt włóknisto-cementowych oraz parametry poszczególnych jego faz: fazy matrycy oraz fazy rozproszonej. Dokładny skład dostępnych na rynku płyt nie jest podawany przez producentów z uwagi na to, że jest to ich tajemnica technologiczna. Omówiono także zagadnienia destrukcji powierzchni i struktury płyt włóknisto-cementowych pod wpływem wysokich temperatur. Jednym z nielicznych autorów, który poruszał powyższe zagadnienia, był Szymków [161]. Skupił się on na zagadnieniach związanych z oddziaływaniem stałymi temperaturami głównie w piecu i dotyczyło to samych płyt, a nie elewacji. Tematyka zniszczenia płyt włóknisto-cementowych w warunkach oddziaływania pożarem nie jest opisana w literaturze naukowej.

Podsumowując, autor niniejszego opracowania zauważa znaczące braki w literaturze przedmiotu przede wszystkim dotyczące:

- braku usystematyzowania jednolitego standardu oceny elewacji wentylowanych w warunkach pożaru;
- braku opisanego wpływu efektu ciągu kominowego w zależności od klasy reakcji na ogień stosowanych okładzin;
- braku korelacji efektu ciągu kominowego oraz zmniejszenia jego wpływu wraz z rozwojem pożaru w systemach elewacji wentylowanych;
- brak opisanego wpływu wiatru i wilgotności powietrza na efekt mechanizmu przeskoku ognia pomiędzy kondygnacjami;



- braku rozpoznania globalnego zjawiska destrukcji elewacji wentylowanych w warunkach pożaru, a w jej konsekwencji odpadania okładzin elewacyjnych oraz pozostałych elementów systemu;
- braku rozpoznania identyfikacji modelu zniszczenia makro- i mikrostruktury płyt włóknisto-cementowych w warunkach oddziaływania rzeczywistym pożarem.

Wobec powyższego autor w pracy zajął się tematyką identyfikacji modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożaru na podstawie między innymi próbek pozyskanych z badań na modelach wielkoskalowych.

Autor pozyskał próbki płyt włóknisto-cementowych po oddziaływaniu pożarem z badań na modelach wielkoskalowych. Badanie te stanowiły również podstawę do uzupełnienia wiedzy naukowej z zakresu globalnego zjawiska odpadania części okładzin elewacyjnych oraz pozostałych elementów systemu w warunkach pożaru. Na podstawie badań wielkoskalowych autor utworzył mapy temperatur, które to wskazują wartość temperaturową w danym momencie badania w poszczególnych strefach modelu. Powyższe elementy były konieczne do identyfikacji modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych w zakresie ich makro- i mikrostruktury. Na podstawie określenia modelu zniszczenia okładziny z płyt włóknisto-cementowych, autor wykonał globalne mapy zniszczenia, wskazujące przydatność poszczególnych elementów okładzin wykonanych z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożarem.

## 4. ZAKRES BADAŃ WŁASNYCH

Zakres przeprowadzonych badań własnych obejmował wykonanie serii badań i analiz okładziny elewacyjnej wykonanej z płyt włóknisto-cementowych. W pojedynczych seriach badań miały zastosowanie również inne okładziny elewacyjne niż płyty włóknisto-cementowe, lecz były one jedynie elementem dodatkowych badań, których celem było uzupełnienie wiedzy z zakresu rozwoju pożaru na modelach rzeczywistych. Okładziny elewacyjne inne niż płyty włóknisto-cementowe wykorzystano ponadto do utworzenia map temperatur wykorzystując wcześniej zamontowane termopary.

Początkowo wykonano badanie w zakresie oddziaływania pożarem na modelach wielkoskalowych, z których to otrzymano próbki okładzin elewacyjnych do dalszych badań. W rozprawie przeprowadzono badania na dwóch rodzajach modeli wielkoskalowych: modelach rzeczywistych elewacji oraz budynku modelowym. Model rzeczywisty elewacji był wykonany w nawiązaniu do procedury badawczej ITB: Procedura PB LP-091/1/11-2014: Procedura badania i oceny ścian zewnętrznych budynków w zakresie odpadania elementów elewacji w przypadku pożaru [80]. Badanie związane było z symulacją rozwoju pożaru, w którym to płomień oraz gorące gazy wydostają się z paleniska symulującego otwór okienny i w znacznym stopniu oddziałują na elewację oraz elementy do niej przyległe. Wykonane zostały również badania elewacji na budynku modelowym, specjalnie przygotowanym wyłącznie na cele badawcze. Modele rzeczywiste elewacji i budynek modelowy miały zastosowaną elewację wentylowaną. Badania na modelach wielkoskalowych umożliwiły rozpoznanie globalnego zjawiska destrukcji elewacji wentylowanej w warunkach pożaru, w tym poszczególnych elementów systemu oraz okładzin elewacyjnych wykonanych z płyt włóknisto-cementowych. Po przeprowadzeniu badania na modelach rzeczywistych elewacji i elewacji budynku modelowego dokonano oceny wizualnej stanu elewacji oraz zakresu jego zniszczenia.

Z okładzin elewacyjnych poddanych badaniom pozyskano próbki płyt włóknisto-cementowych. Próbkę poddaną oddziaływaniu pożarem zweryfikowano określając różne ich parametry wytrzymałościowe, ocenę ich powierzchni i struktury. Ocenę parametrów wytrzymałościowych wykonano zgodnie z informacjami przedstawionymi w normie PN-EN 12467: Płyty płaskie włóknisto-cementowe. Charakterystyka wyrobu i metody badań [114].

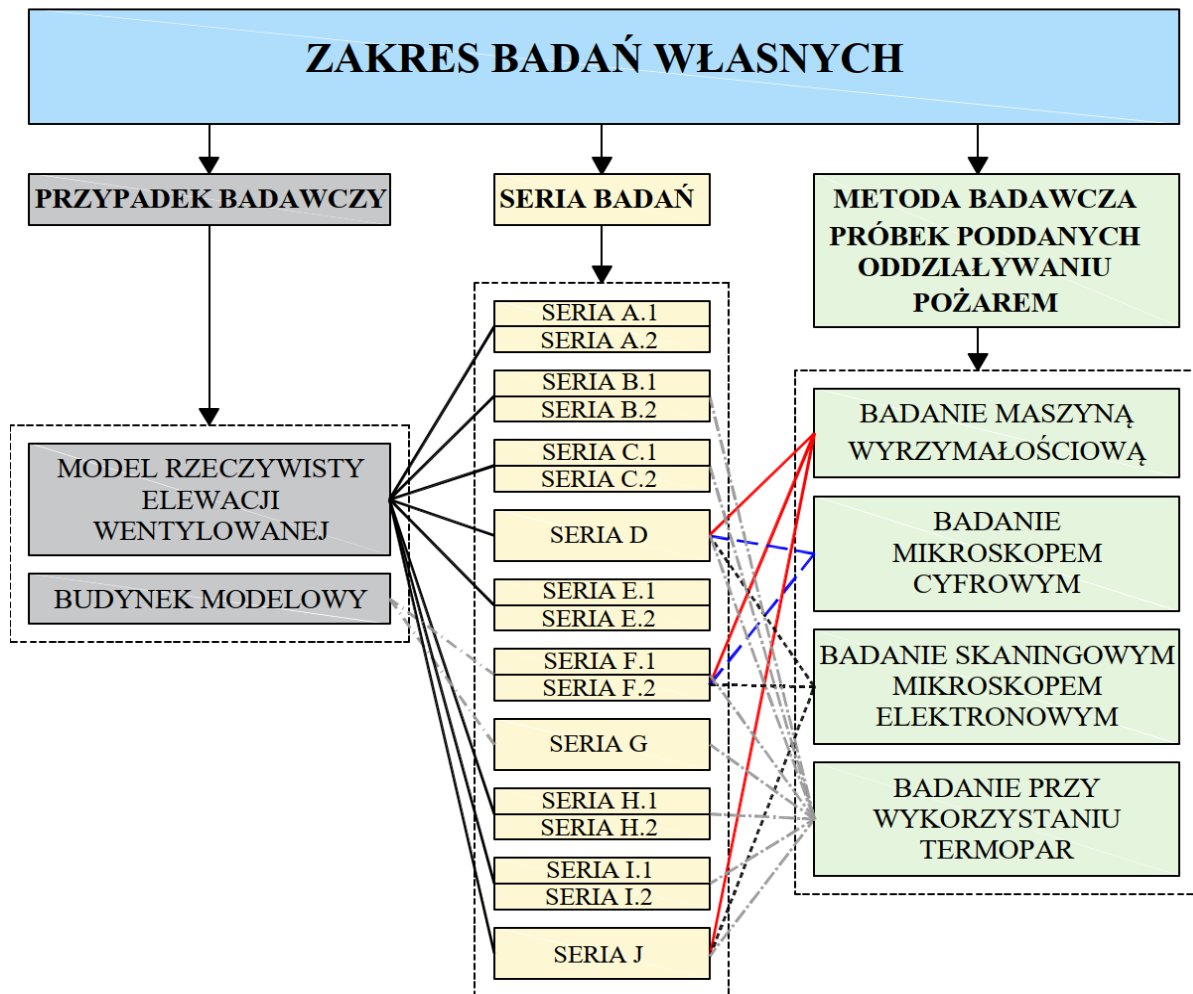
Kolejnym badaniem mającym na celu ocenę stopnia destrukcji płyt włóknisto-cementowych była weryfikacja powierzchni przełamu próbek płyt przy wykorzystaniu mikroskopu cyfrowego oraz analiza ich struktury poprzez badanie objętościowe przy wykorzystaniu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM).

Zakres przeprowadzonych badań obejmował łączenie dziesięć serii oznaczonych od A do J, a każda seria znalazła odniesienie do przypadku badawczego. Przypadkami badawczymi były badania wielkoskalowe, przy pomocy których otrzymano okładziny elewacyjnej w wyniku oddziaływania pożarem. Ostatni element stanowi metoda badawcza wykorzystana do oceny parametrów fizycznych

i wizualnych stopnia destrukcji próbek płyt. Na potrzeby określenia przebiegu rozwoju pożaru w części badań zastosowano termopary, które mierzyły przebieg temperatury w funkcji czasu.

Wszystkie próbki płyt pozyskane z modeli wielkoskalowych po oddziaływaniu pożarem miały również swoje odpowiedniki w postaci próbek referencyjnych o identycznych gabarytach.

Poszczególne przypadki badawcze i metody badawcze dla serii badań przedstawiono na schemacie pokazanym na rysunku 4.1.



**Rys. 4.1.** Zestawienie poszczególnych przypadków badawczych i metod badawczych dla serii badań

#### 4.1 Okładziny elewacyjne wykorzystane w modelach wielkoskalowych

Serie badań na modelach wielkoskalowych przeprowadzono z okładziną elewacyjną z płyt włóknisto-cementowych oraz pozostałych płyt. W pozostałych seriach badań były zarówno te wykonane z materiałów palnych (HPL), jak i niepalnych (okładziny ceramiczne, inne materiały kompozytowe).

W pracy zajmowano się identyfikacją modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożarem, tak więc po wykonaniu badań

na modelach wielkoskalowych do dalszych badań zostały pobrane wyłącznie próbki płyt włóknisto-cementowych. Próbki te w kolejnych fazach zostały poddane szczegółowej ocenie parametrów wytrzymałościowych oraz ich mikro- i makrostruktury. W tabeli 4.1 przedstawiono materiały, z których wykonane były poszczególne serie badań, gwiazdką oznaczono serie badań wykonanych na budynku modelowym.

**Tabela 4.1.** Zestawienie serii badań wraz z materiałem, z którego są wykonane

<b>Seria badań</b>	<b>Material</b>
A.1	HPL
A.2	Płyty włóknisto-cementowe
B.1	Okładziny ceramiczne
B.2	Inne materiały kompozytowe
C.1	HPL
C.2	Płyty włóknisto-cementowe
D	Płyty włóknisto-cementowe
E.1	Okładziny ceramiczne
E.2	Płyty włóknisto-cementowe
F.1*	Płyty wiórowo-cementowe
F.2*	Płyty włóknisto-cementowe
G*	Płyty wiórowo-cementowe
H.1	HPL
H.2	Płyty włóknisto-cementowe
I.1	Okładziny ceramiczne
I.2	Płyty włóknisto-cementowe
J.1	Płyty włóknisto-cementowe
J.2	Inne

\*Serie badań wykonane na rzeczywistej elewacji budynku modelowego

Modele wielkoskalowe z okładzinami elewacyjnymi palnymi zostały wykorzystane wyłącznie do zrozumienia globalnego problemu rozwoju pożaru oraz rozprzestrzeniania się ognia poprzez m.in. wpływ przestrzeni wentylacyjnej oraz kształtu pióropusza ognia wydobywającego się z komory spalania.

Modele wielkoskalowe z okładzinami elewacyjnymi niepalnymi, niebędącymi płytami włóknisto-cementowymi a spiekami ceramicznymi wykorzystano dodatkowo w zakresie odczytu temperatur z termopar i utworzenia map temperatur. Umożliwiło to uzyskanie większej próby rozkładu temperatur na modelach wielkoskalowych.

Do dalszych badań wykorzystano jedynie próbki okładziny elewacyjnej z płyt włóknisto-cementowych.

#### 4.1.1 Płyty włóknisto-cementowe

Serie badań: A.2, C.2, D, E.2, F.2, H.2, I.2 oraz J.1 stanowią okładziny wykonane z płyt włóknisto-cementowych. Płyty te są dostępne na rynku polskim i stanowią przekrój materiałów dostępnych na nim. Wszystkie badane płyty przeznaczone są do zastosowania jako okładziny zewnętrzne, posiadają standardową grubość 8 mm. Seria A.2 i C.2 stanowi okładziny wykonane z płyt włóknisto-cementowych barwionych w masie o przeznaczeniu zewnętrznym i grubości 8 mm. Serie D, E.2 oraz J.1 stanowią okładziny elewacyjne wykonane z płyt włóknisto-cementowych o kolorystyce naturalnej i grubości 8 mm. Serie F.2, H.2 oraz I.2 stanowią okładziny elewacyjne wykonane z płyt włóknisto-cementowych o kolorystyce naturalnej i grubości 8 mm. Wszystkie płyty włóknisto-cementowe wykorzystane jako okładziny elewacyjne wraz z charakterystycznymi parametrami przedstawiono w tabeli 4.2. Gwiazdką oznaczono serie badań dotyczących badania elewacji budynku modelowego.

Na rynku znajdują się również płyty o innych grubościach, tj. płyty o grubości 6 mm, stosowane głównie jako materiały do wnętrza. Płyty włóknisto-cementowe do zastosowań typowo wewnętrznych charakteryzują się przede wszystkim odpowiednimi atestami do zastosowań wewnętrznych i niższymi parametrami wytrzymałościowymi. Dostępne są również płyty włóknisto-cementowe o grubościach 10 i 12 mm, lecz z uwagi na ich znacząco większą wagę i wyższe koszty rzadko kiedy są stosowane. Wobec powyższych obecnie najpopularniejszymi płytami są płyty o grubości 8 mm.

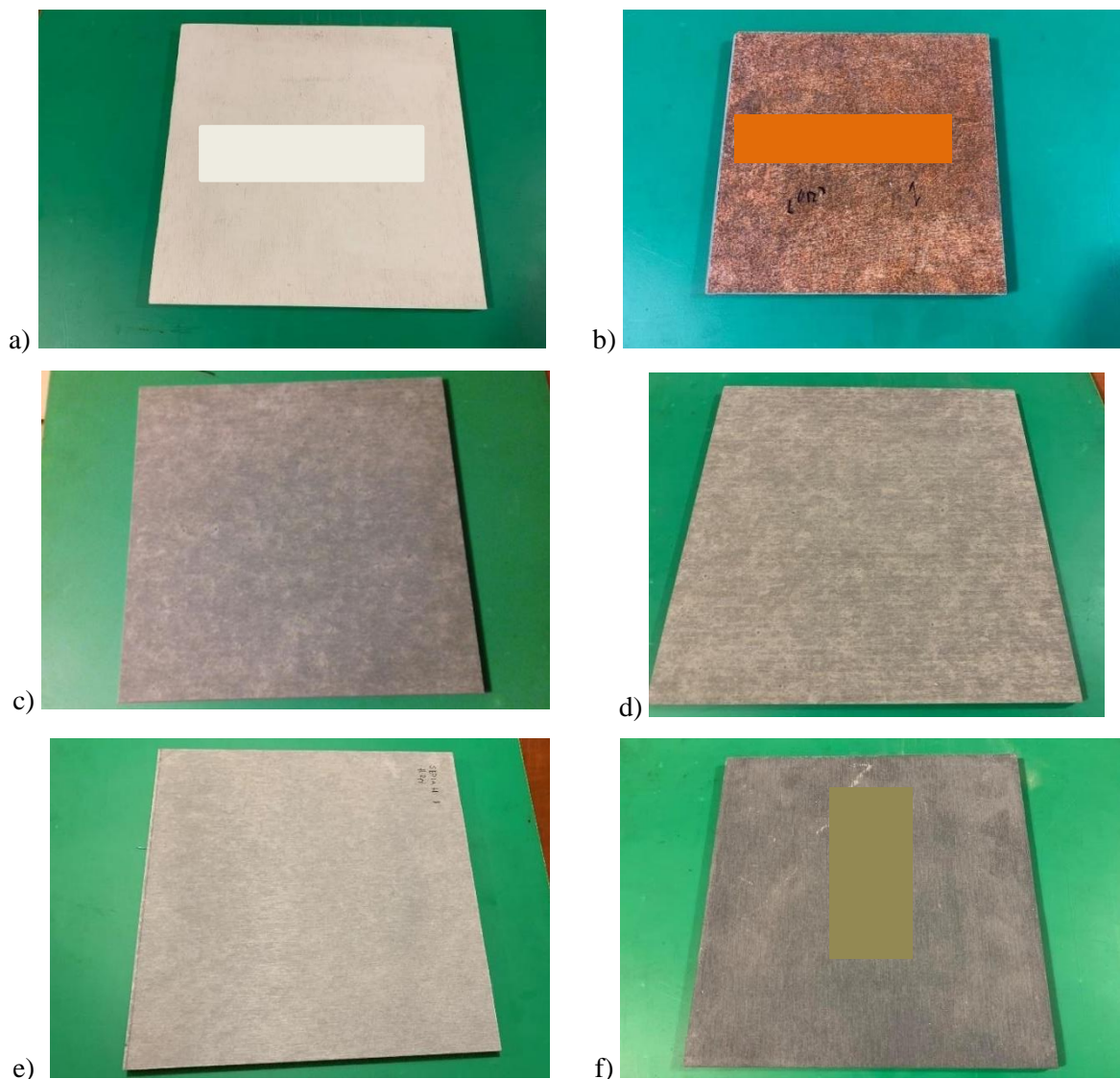
Poszczególne serie badań stanowiły płyt włóknisto-cementowych różnych producentów, wobec czego charakteryzowały się innymi parametrami wytrzymałościowymi i klasami reakcji na ogień. Wszystkie płyty włóknisto-cementowe zastosowane jako okładziny elewacyjne były materiałami niepalnymi zgodnie z normą [19]. Skład wszystkich płyty włóknisto-cementowych był wykonany z zastosowaniem cementu portlandzkiego CEM I 42,5N. Pozostałe składniki stosowane w tych płytach stanowią receptury, które są ściśle chronione, a informacje dotyczące konkretnych składników, ich ilości i dostawców oraz szczegółów produkcyjnych stanowią *know-how* producenta. Ponadto w badanych płytach włóknisto-cementowych są m.in.: włókna celulozowe, włókna syntetyczne PVA lub PP oraz szereg dodatków, w tym mączka wapienna. Płyty barwione w masie posiadały dodatkowo domieszki barwiące.

**Tabela 4.2.** Zestawienie płyt włóknisto-cementowych użytych do badań z wykazem podstawowych parametrów technicznych

Seria badań	Grubość płyty [mm]	Barwa płyty	Zastosowanie	Gęstość minimalna w stanie suchym $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Prasowanie podczas produkcji	Wytrzymałość na zginanie wzdłuż włókien MOR [MPa]	Wytrzymałość na zginanie w poprzek włókien MOR [MPa]	Moduł Sprężystości [GPa]	Klasa reakcji na ogień	Współczynnik rozszerzalności temperaturowej [mm/mK]
A.2	8,0	Barwiona w masie	zewnątrzne	>1,58	tak	32	22	14	A2-s1, d0	<0,01
C.2	8,0	Barwiona w masie	zewnątrzne	1,65	tak	24	17	15	A2-s1, d0	0,01
D	8,0	Naturalna - malowana	zewnątrzne	1,75	tak	>24	>24	-	A1-s1, d0	-
E.2	8,0	Naturalna - malowana	zewnątrzne	1,75	tak	>24	>24	-	A1-s1, d0	-
F.2*	8,0	Barwiona w masie	zewnątrzne	$\geq 1,60$	tak	$\geq 18$		15	A1-s1, d0	1,5
H.2	8,0	Barwiona w masie	zewnątrzne	$\geq 1,50$	tak	$\geq 18$		16	A1-s1, d0	-
I.2	8,0	naturalna	zewnątrzne	$\geq 1,55$	tak	>26	>22	-	A1-s1, d0	-
J.1	8,0	Naturalna - malowana	zewnątrzne	1,75	tak	>24	>24	20	A1-s1, d0	-

\*Serie badań wykonane na rzeczywistej elewacji budynku modelowego

Wymiary próbek referencyjnych, które pobrano do wykonania badania wytrzymałości na zginanie MOR przy badaniu trójpunktowego zginania to 250 × 250 mm. Są to wymiary zalecane przez normę [114]. W przypadku braku możliwości pobrania próbek o wymiarach zalecany przez normę z uwagi na dużą destrukcję materiału pod wpływem oddziaływania wysokimi temperaturami, pobrano próbki o możliwie największych wymiarach. Dla próbek pobranych z okładziny elewacyjnej przygotowano próbki referencyjne o odpowiadającym im gabarycie. Na rysunku 4.2 przedstawiono próbki referencyjne materiałów dla poszczególnych serii.



**Rys. 4.2.** Przykładowe zdjęcia próbek referencyjnych serii badań wykorzystujących okładziny z płyt włóknisto-cementowych użytych do badań: a) A.2, b) D, c) E.2, d) F.2, e) I.2, f) J.1

#### 4.1.2 Pozostałe materiały

Serie badań: A.1, B.1, B.2, C.1, E.1, H.1, I.1, J.2 stanowiły okładziny elewacyjne wykonane z materiałów innych niż płyty włóknisto-cementowe. Serie tych badań nie poddano analizie w zakresie identyfikacji modelu zniszczenia, posłużyły one jedynie do zidentyfikowania globalnego problemu zjawisk występujących w rozwoju pożaru, rozszerzenia zakresu wiedzy oraz utworzenia map temperatur (uwzględniono tylko okładziny wykonane z materiałów niepalnych: spieki ceramiczne). Materiały wykorzystane w serii badań A.1, B.1, B.2, C.1, E.1, H.1, I.1, J.2 przedstawiono w tabeli 4.3.

**Tabela 4.3.** Zestawienie okładzin elewacyjnych wykonanych z materiałów innych aniżeli płyty włóknisto-cementowe dla serii badań

Seria	Materiał	Klasa reakcji na ogień
A.1	HPL	B-s2, d0
B.1	Okładziny ceramiczne	A2 - s1, d0
B.2	Inne materiały kompozytowe	A2 - s1, d0
C.1	HPL	B-s2, d0
E.1	Okładziny ceramiczne	A2 - s1, d0
H.1	HPL	B-s2, d0
I.1	Okładziny ceramiczne	A2 - s1, d0
J.2	Inne	nie dotyczy

#### **4.2 Stanowisko badawcze modeli rzeczywistych elewacji wg ITB – procedura PB LP-091/1/11-2014 [85]**

Badania rozpoczęto na modelu rzeczywistym elewacji w skali naturalnej. Skala naturalna w przypadku tych badań była skalą średnią, zgodnie z nomenklaturą przedstawioną w pkt. 3.1.2. Badania symulowały oddziaływanie ogniem na elewacje w warunkach zbliżonych do rzeczywistego pożaru. Na potrzeby realizacji pracy wykorzystano procedurę ITB – PB LP-091/1/11-2014 [80], pozostałe procedury wykorzystywane w Europie i na świecie przedstawiono w pkt. 3.1.2. Procedura ITB została utworzona na potrzeby oceny nieodpadania elementów okładzin elewacyjnych. Ponadto procedura ta w Polsce jest bardzo popularna, tak więc był to również istotny element wskazujący do wykorzystania tej procedury badawczej. Badanie trwało 60 lub 120 minut, co ma odniesienie w przepisach obowiązujących w Polsce i odpowiada spełnieniu wymagań co najmniej budynkom klasy B w zakresie uniemożliwienia odpadania elementów okładzin elewacyjnych wg WT [132].

Sposób oddziaływania pożarem odbywa się według zasady „*The Large Scale Facade Test*”, imitującej wydostawanie się płomieni i gorących gazów z paleniska symulującego otwór okienny i oddziaływanie nimi na elewację. Czas badania był zależny od tego, dla jakiego budynku zostaje przewidziana elewacja w zakresie bezpieczeństwa pożarowego, jakiej klasie budynek będzie odpowiadał zgodnie z WT [132]. Oddziaływanie odbywa się zgodnie z krzywą standardową – pożar „normowy” [82]. Na rysunku 4.3 przedstawiono przykładowe badanie oddziaływania pożarem na model rzeczywisty przy wykorzystaniu procedury ITB – procedura PB LP-091/1/11-2014 [80].



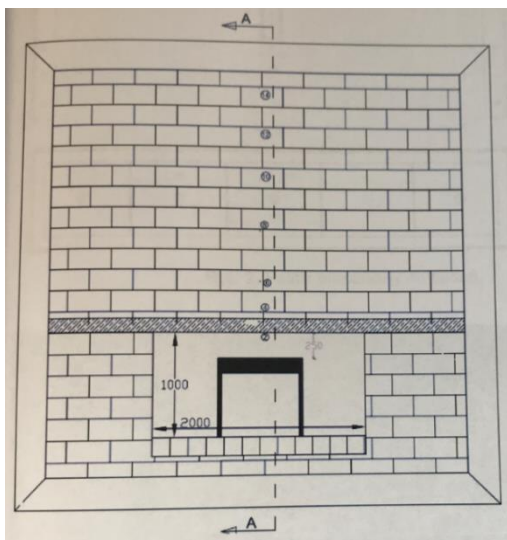


**Rys. 4.3.** Przykładowe badanie oddziaływania pożarem na modelu rzeczywistym przy procedurze ITB – procedura PB LP-091/1/11-2014 [80]

Źródło: Materiały własne.

Stanowisko badawcze wykonane zostało przy wykorzystaniu pieca badawczego Spark o mocy 2,7MW, producent: SECO/ WARWICK S.A., o wymiarach światła pieca 3700 mm×3700 mm×1500 mm. Po stronie zewnętrznej pieca wykonana jest rama żelbetowa wypełniona bloczkami silikatowymi. Model wykonany jest to zgodnie z procedurą opisaną w [80]. Widok zaplecza stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 4.4.

Piec badawczy Spark jest zespolony z ramą, którą utrzymuje, łącznie stanowiąc platformę badawczą. Piec ten przedstawiono na rysunku 4.5.



**Rys. 4.4.** Widok zaplecza stanowiska badawczego przy procedurze ITB – procedura PB LP-091/1/11-2014 [80]



**Rys. 4.5.** Widok pieca badawczego Spark

Źródło: Materiały własne.

Źródłem ognia jest gazowy palnik piaskowy wykonany w oparciu o normę EN 14390 [119]. Spalanie odbywa się w prostokątnej komorze o wymiarach przekroju 2000 mm × 1000 mm i głębokości 1000 mm. Wnętrze ściany wykonane jest z niepalnych płyt Promat na ruszcie stalowym, a komora spalania jest otwarta z frontu. Komorę spalania i palnik gazowy pokazano na rysunku 4.6.



**Rys. 4.6.** Widok prostopadłościowej komory spalania oraz palnika gazowego

Źródło: Materiały własne oraz [80]

Jako źródło paliwa dla palnika gazowego przedstawionego powyżej stosuje się butlę z płynnym propanem o czystości około 95%, ustalona wartość przepływu ustawiona na regulatorze masowym na poziomie 3,8 l/s, co odpowiada utracie ok 27,8 kg gazu (propan-butan) przez 60 minut. Butle z gazem są umiejscowione w baniakach z wodą celem zwiększenia stabilności temperatury. Butle są połączone przez przepływomierz BOOKS HFM-301 ustalający odpowiedni przepływ gazu do palnika i odpowiadający przebiegowi krzywej standardowej [18]. Urządzenia dostarczające paliwo do palnika pokazano na rysunku 4.7.



**Rys. 4.7.** Widok butli z gazem oraz przepływomierza

Źródło: Materiały własne

Celem laminaryzacji przepływu powietrza stosowano dodatkowy nadmuch pochodzący z wnętrza komory spalania. Wartość nadmuchu w komorze spalania ustalano na poziomie 3,3 m/s i mierzono ją termoanemometrem masowym. Regulacja nawiewu prowadzona jest z jednostki PC. Lokalizację nadmuchu aplikacją sterującą nią przedstawiono na rysunku 4.8.



**Rys. 4.8.** Lokalizacja nadmuchu oraz aplikacja sterująca badaniem

Źródło: Materiały własne

Celem oczyszczenia pomieszczenia z niebezpiecznych spalin, w którym odbywa się spalanie nad stanowiskiem badawczym umiejscowiono okap, którego zadaniem jest pochłanianie spalin i dymu uwalnianego podczas badania. Okap pokazano na rysunku 4.9.



**Rys. 4.9.** Okap podczas badania

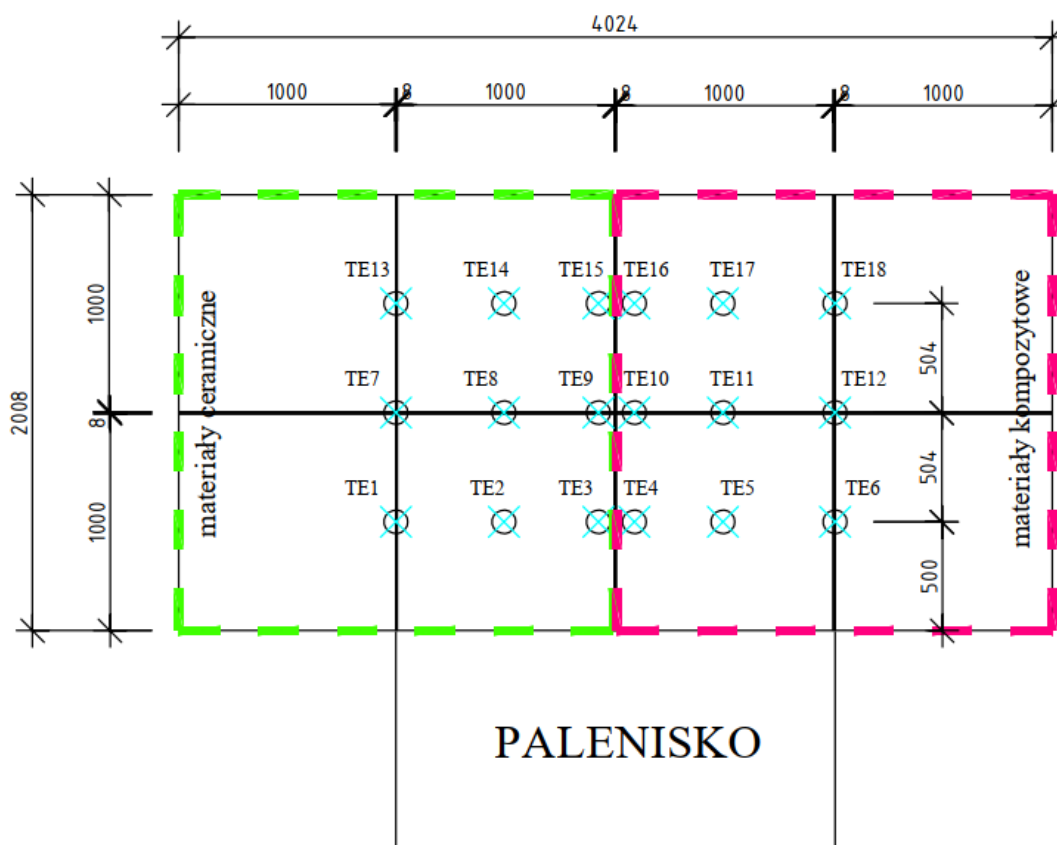
Źródło: Materiały własne

Platforma badawcza dla modeli rzeczywistych wszystkich serii była taka sama, lecz poszczególne serie badań różniły się między sobą m.in. rodzajem podkonstrukcji, detalami zamontowania, rodzajem i wymiarami okładzin elewacyjnych, sposobem zabezpieczenia

poszczególnych elementów i rozwiązań glifów, układem okładzin itd. Więcej szczegółów dotyczących poszczególnych serii przedstawiono w dalszej części pracy.

#### 4.2.1 Przykładowe opomiarowanie stanowiska badawczego

Część modeli rzeczywistych elewacji było wyposażonych w czujniki do pomiaru temperatury – termopary. W zależności od możliwości montażowych i badawczych termopary były umieszczane na powierzchni płyt i w pustce powietrznej. Przykładowe rozmieszczenie termopar przedstawiono na rysunku 4.10. Opomiarowania termoparami dla poszczególnych serii badań różniły się między sobą. Wynikało to m.in. z różnic poszczególnych materiałów, ich wymiarów czy sposobu montażu.



Rys. 4.10. Przykładowe rozmieszczenie termopar

Działanie termopar jest następujące: przekazują sygnał wartości temperatury do jednostki PC, następnie dane są prezentowane na monitorze w czasie rzeczywistym, a wyniki są zapisywane. Osprzęt odpowiadający za przetwarzanie i przedstawianie wyników z termopar przedstawiono na rysunku 4.11.

Na rysunku 4.12 przedstawiono przykładowe modele rzeczywiste elewacji przygotowane do badań.



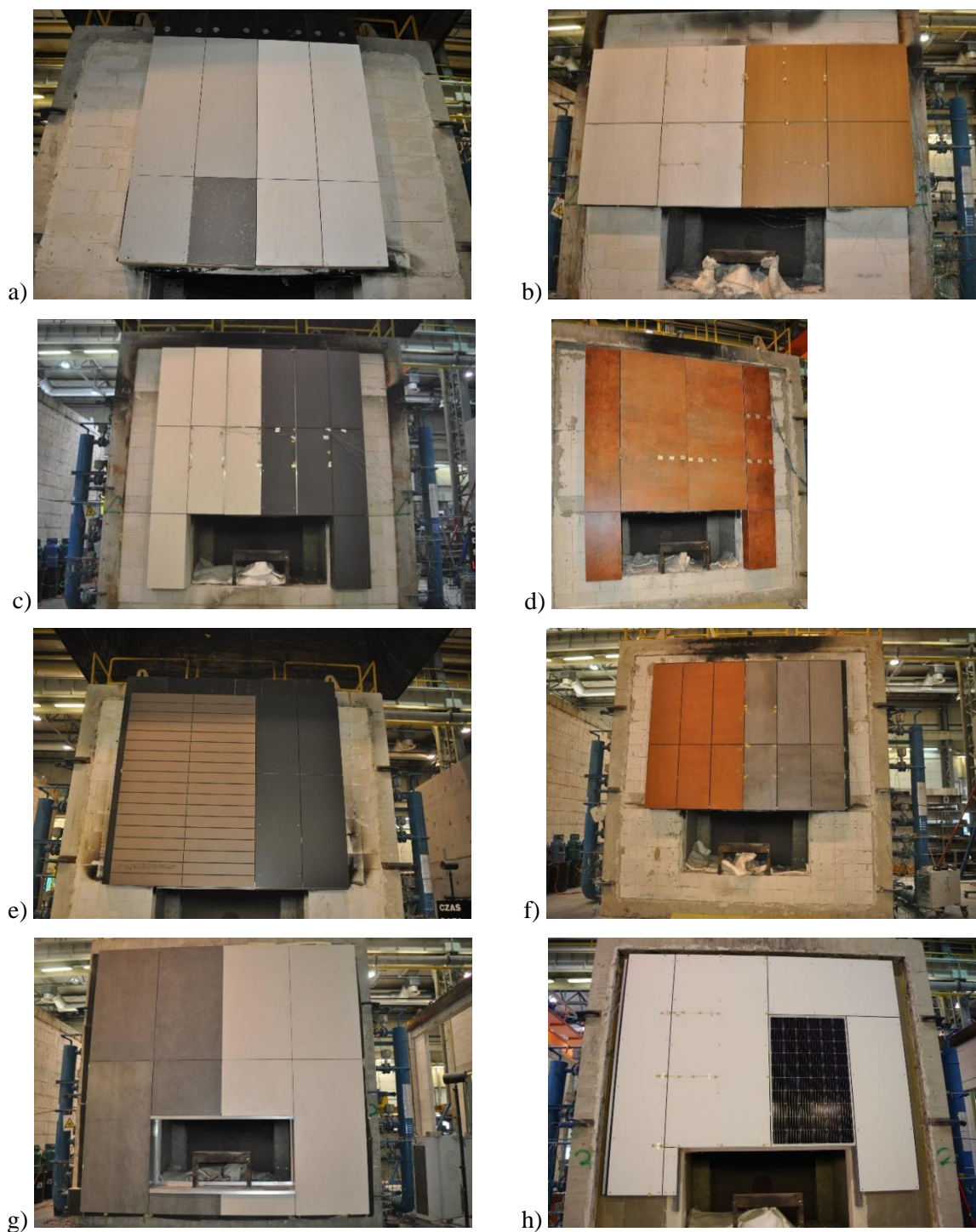
**Rys. 4.11.** Osprzęt odpowiadający za przetwarzanie i przedstawianie wyników z termopar  
Źródło: Materiały własne.



**Rys. 4.12.** Modele rzeczywiste elewacji przygotowane do badań.  
Źródło: Materiały własne.

## 4.2.2 Stanowisko badawcze modeli rzeczywistych elewacji

Na rysunku 4.13 przedstawiono modele rzeczywiste elewacji dla poszczególnych serii badań. Poszczególne modele rzeczywiste wyposażone były w termopary, które w większości przypadków były dobrze widoczne dzięki zastosowaniu żółtych taśm montażowych.



**Rys. 4.13.** Modele rzeczywiste elewacji dla poszczególnych serii: a) seria badań A; b) seria badań B; c) seria badań C; d) seria badań D; e) seria badań E; f) seria badań H; g) seria badań I; h) seria badań J

### 4.3 Stanowisko badawcze elewacji w budynku modelowym

W ramach pracy zrealizowano również badanie oddziaływania pożarem na elewacje w budynku modelowym. Badania udało się zrealizować przy współpracy z Instytutem Techniki Budowlanej. Budynek ten był budynkiem szkieletowym o konstrukcji drewnianej, obudowany materiałami nierozprzestrzeniającymi ognia. Budynek został przygotowany wyłącznie na cele badawcze.

Elewacja została zaprojektowana jako system elewacji wentylowanej ze szczelinami wentylacyjnymi na dole w punkcie bazowym i na górze pod obróbką połaci. Na rysunku 4.14 przedstawiono etap powstawania modelowego budynku, który był poddany badaniu.

Kolejno zrealizowano również weryfikację i porównanie rozwoju pożaru na modelu rzeczywistym elewacji z rozwojem pożaru na elewacji budynku modelowego.



**Rys. 4.14.** Etap powstawania modelowego budynku

Źródło: Paweł Sulik, ITB.

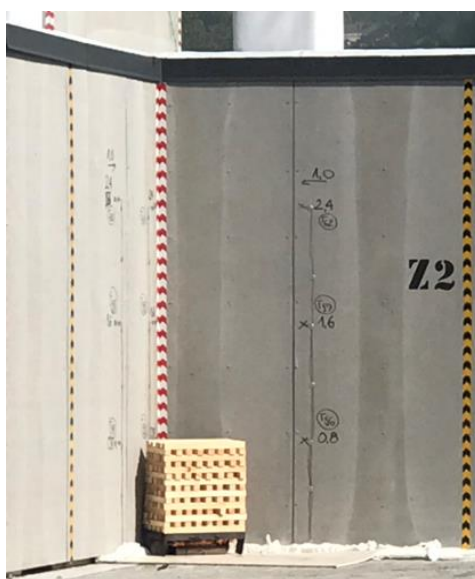
Serię badań F przedstawiono na rysunku 4.15. Zawierała ona okładziny elewacyjne wykonane z płyt włóknisto-cementowych (w części oznaczonej na czerwono) oraz płyt wiórowo-cementowych. Serię badań G przedstawiono na rysunku 4.16. Zawierała ona okładziny elewacyjne wykonane z płyt wiórowo-cementowych.

Źródłem paliwa dla pożaru budynku modelowego były belki drewniane, a zapłon nastąpił przy użyciu 200 ml heptanu. Przykładowe belki drewniane o wymiarach  $40 \times 40 \times 300$  mm oraz  $40 \times 40 \times 600$  mm (łącznie 20 kg drewna) przedstawiono na rysunku 4.17.

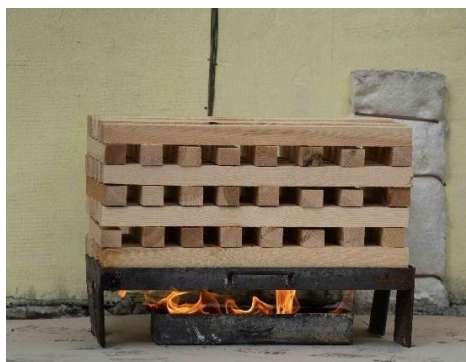




**Rys. 4.15.** Elewacja wentylowana na budynku modelowym – seria badań F z oznaczoną lokalizacją z okładzinami z płyt włóknisto-cementowych



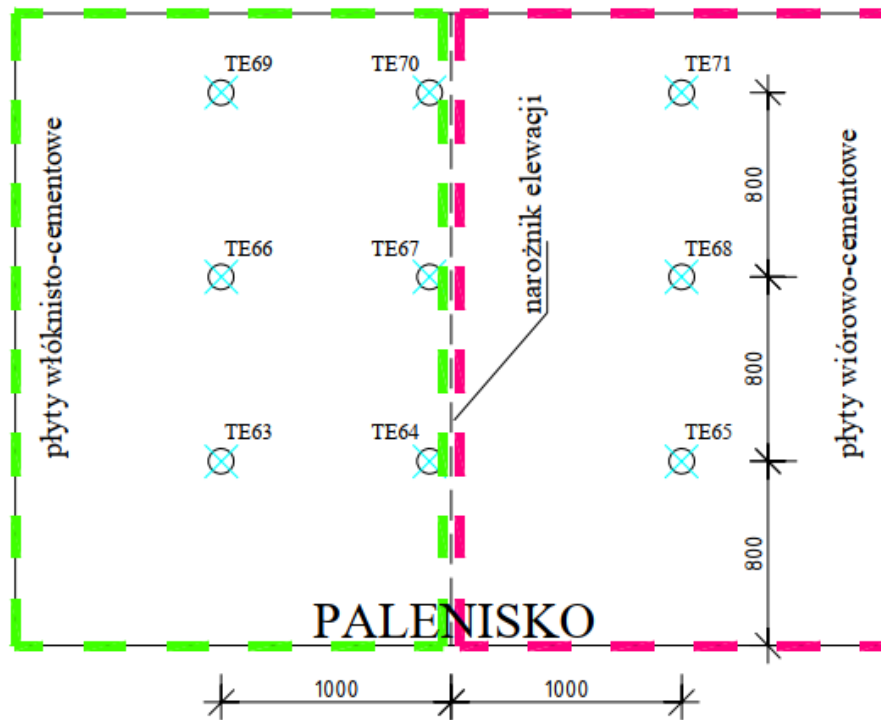
**Rys. 4.16.** Elewacja wentylowana na budynku modelowym – seria badań G



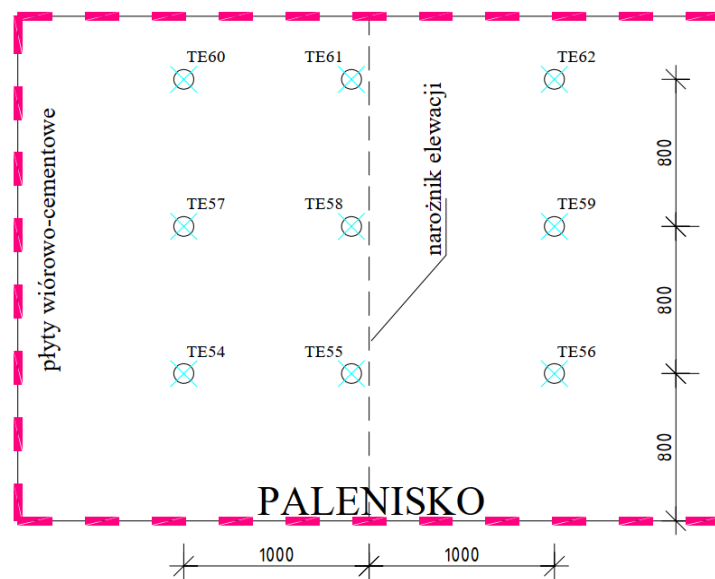
**Rys. 4.17.** Źródło pożaru dla badania

## Opomiarowanie elewacji w budynku modelowym

Elewacje dla serii badań F i G zostały wyposażone w termopary, które mierzyły przebieg temperatury w funkcji czasu. Rozmieszczenie termopar na elewacji dla serii badań F przedstawiono na rysunku 4.18, a dla serii badań G – na rysunku 4.19.



Rys. 4.18. Lokalizacja termopar na serii badań F



Rys. 4.19. Lokalizacja termopar na serii badań G

#### 4.4 Badanie wytrzymałości na zginanie *MOR* wg PN-EN 12467 [114]

Podstawowe parametry i charakterystykę płyt włóknisto-cementowych przedstawia norma PN-EN 12467: Płyty płaskie włóknisto-cementowe. Charakterystyka wyrobu i metody badań [114]. Norma ta przywołuje nie tylko podstawowe parametry płyt, ale również metodykę i sposób badania poszczególnych właściwości płyt włóknisto-cementowych, m.in. wytrzymałość na zginanie *MOR*, badanie nasiąkliwości, itd. Minimalna wytrzymałość na zginanie płyt włóknisto-cementowych wyrażona w MPa, nie powinna być mniejsza od wartości podanej w tabeli 4.4 [114] i jest średnią wartością otrzymaną z badań próbek w dwóch kierunkach. Minimalna wytrzymałość na zginanie płyt badanych w najslabszym kierunku również nie powinna być mniejsza niż 70% wartości podanej dla średniej z dwóch kierunków.

**Tabela 4.4.** Minimalna wytrzymałość na zginanie *MOR* płyt włóknisto-cementowych

Źródło: Tablica 6 [114]

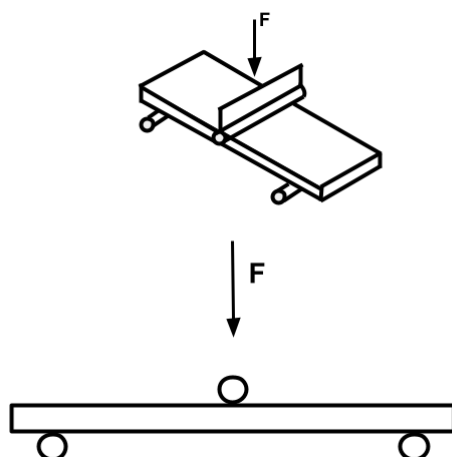
Minimalna wartość <i>MOR</i> dla metody mokrej MPa		Minimalna wartość <i>MOR</i> dla metody suchej MPa	
Klasa	Kategoria A i B	Klasa	Kategoria A i B
1	4	1	4
2	7	2	7
3	13	3	10
4	18	4	16
5	24	5	22

UWAGA 1 Jeżeli producent określa *MOR* wyrobu, to powinna być ona na akceptowalnym poziomie jakości (AQL) 4%

UWAGA 2 Dla płyt z fakturą, *MOR* nie może być stosowana do obliczenia mechanicznych właściwości wyrobu

Badanie wytrzymałości na zginanie *MOR* wykonuje się zgodnie z przedstawioną procedurą w normie PN-EN 12467 [114]. Norma rekomenduje wymiar badanej próbki 250 × 250 mm przy rozstawie podpór 200 mm, lecz dopuszcza również inne wymiary. W przypadku pobieranych próbek z modeli wielkoskalowych nie zawsze udawało się osiągnąć wymiary zalecane ze względu na wcześniejsze oddziaływania na niego wysokimi temperaturami oraz uszkodzenia powstałe podczas badań. Dla każdej próbki poddanej oddziaływaniu pożarem przygotowano próbkę referencyjną o identycznych wymiarach celem oszacowania procentowej redukcji wytrzymałości na zginanie.

Wytyczne i sposób badania próbek przedstawione są w normie PN-EN 12467 [114], w tym m.in. informacja, iż zginanie musi odbywać się ze stałą prędkością odkształcani. Za podparcie służą dwie równoległe podpory o kształcie walca, w tym jedna zamocowana na stałe, druga z możliwością przemieszczana wzdłuż próbki. Próbka jest obciążana poprzez walec, który pośredniczy w przeniesieniu odkształcenia. Posiada on taki promień jak podpory, jest umieszczony równoległe i symetrycznie w stosunku do podpór. Wymagania w formie ilustracji przedstawiono na rysunku 4.20.



**Rys. 4.20.** Schematyczne wymagania dla badania wytrzymałości *MOR*

Źródło: Rysunki 3a i 3b [114]

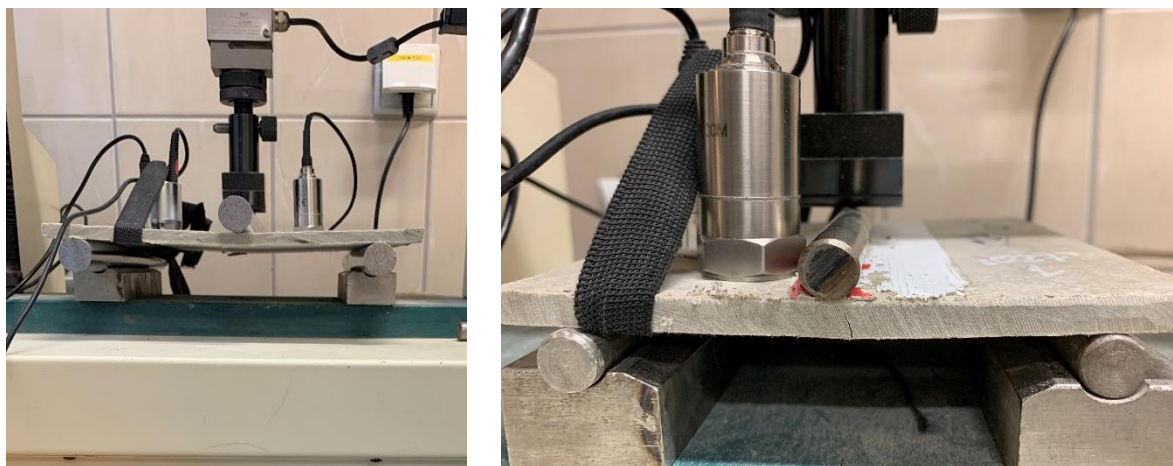
Badania trójpunktowego zginania na potrzeby pracy zostały wykonane na urządzeniu Hounsfield model H1 KS. Urządzenie wyposażone jest w uchwyty, w których umieszcza się podpory w postaci walców. Na potrzeby badania wytrzymałości na zginanie *MOR*, w zależności od gabarytów próbek, używano średnic walców #14 i #22. Maszynę do badań wytrzymałościowych przedstawiono na rysunku 4.21.

Na rysunku 4.22 przedstawiono przykładowe próbki, które zostały poddane badaniu w maszynie wytrzymałościowej.



**Rys. 4.21.** Maszyna wytrzymałościowa do badania wytrzymałości na zginanie *MOR*

Źródło: Materiały własne



**Rys. 4.22.** Próbkki poddane badaniu w maszynie wytrzymałościowej

Źródło: Materiały własne

Na podstawie badania na maszynie wytrzymałościowej wyznaczono wytrzymałość na zginanie  $MOR$  ze wzoru:

$$MOR = \frac{3Fl_s}{2be^2} \quad (4.1)$$

gdzie:

$MOR$  – wytrzymałość na zginanie [MPa]

$F$  – siła niszcząca [N]

$l_s$  – rozstaw podpór [mm]

$b$  – szerokość próbki [mm]

$e$  – średnia grubość próbki [mm];

oraz moduł Younga przy zginaniu ze wzoru:

$$E_D = \frac{Fl_s^3}{4fbe^3} \quad (4.2)$$

gdzie:

$E_D$  – moduł Younga [GPa]

$F$  – siła [N]

$l_s$  – rozstaw podpór [mm]

$f$  – ugięcie [mm]

$b$  – szerokość próbki [mm]

$e$  – grubość próbki [mm].

Na podstawie wykresów z przebiegiem naprężeń zginających  $\sigma_m$  z badania  $MOR$  wyznaczono granicę proporcjonalności  $LOP$  (z ang. *Load of Proportionality*), która ta jest granicą stosowalności prawa Hooke'a, czyli granicy, do której za przyrost wydłużenia jednostkowego odpowiadają

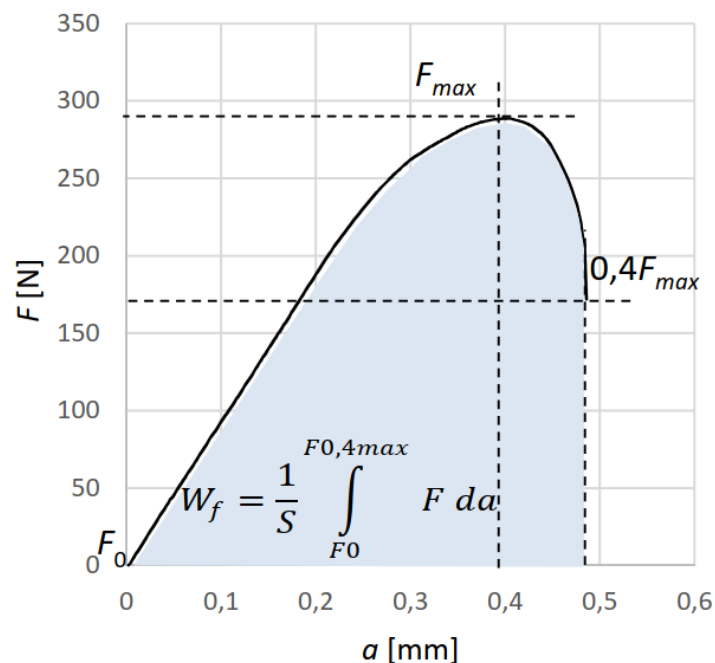
proporcjonalne przyrosty naprężeń. Granicę wyznaczono przy wykorzystaniu metody graficznej. Energia pochłonięta podczas próby zginania została określona jako praca łamania  $W_f$  wykonywana pod krzywą ugięcia, tak jak pokazano to na rysunku 4.23. Przyjęto zgodnie z [130], iż łamanie zostało rozpoczęte przy początkowej sile  $F_0 = 2\text{N}$  i postępowało aż do ostatecznego zmniejszenia do 40% maksymalnego obciążenia  $F = 0,4 F_{max}$ , zgodnie z następującym wzorem [x130]:

$$W_f = \frac{1}{S} \int_{F_0}^{0,4F_{max}} F da \quad (4.3)$$

gdzie:

$S$  – pole przekroju próbki [ $\text{m}^2$ ]

$a$  – odkształcenie podczas zginania [ $\text{m}$ ].



**Rys. 4.23.** Graficzna interpretacja pracy łamania  $W_f$  [161]

## 4.5 Stanowisko badawcze z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego

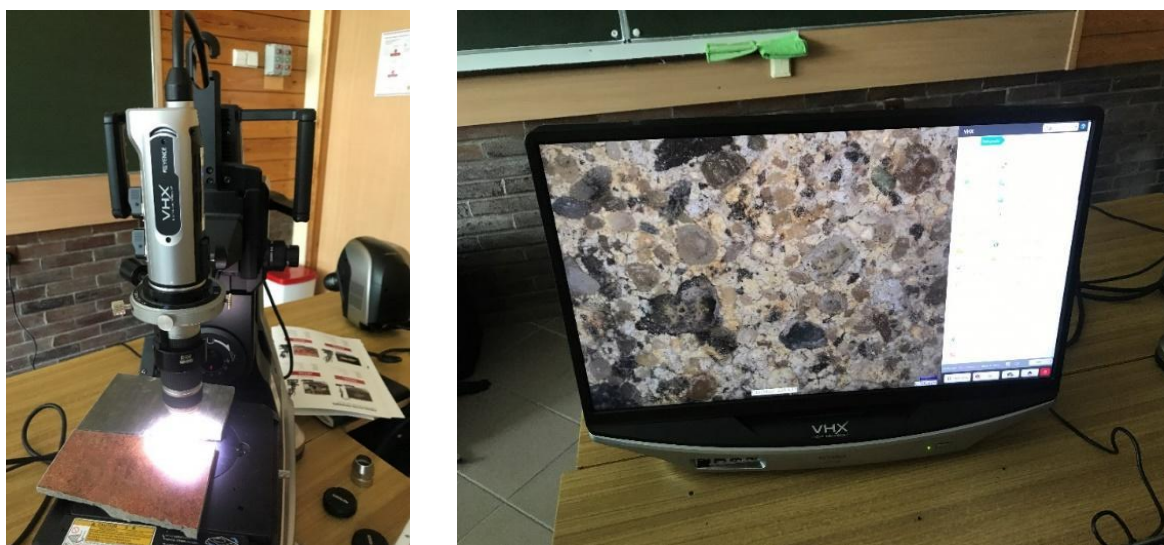
Na potrzeby analizy powierzchni próbek pobranych po badaniach przedstawionych w punktach wcześniejszych wykonano badania przy wykorzystaniu mikroskopu Keyence VH×-7000 series. Stanowisko badawcze z mikroskopem, którym wykonano weryfikację powierzchni płyt włóknisto-cementowych, przedstawiono na rysunku 4.24.



**Rys. 4.24.** Mikroskop cyfrowy Keyence VH×-7000 series

Źródło: Materiały własne

Urządzenie wyposażone było w jednostkę mikroskopu cyfrowego, która w zależności od rodzaju obiektywu może robić zdjęcia w zakresie przybliżenia  $\times 20 - \times 4000$  (na potrzeby badań używany był obiektyw szerokokątny oraz standardowy o maksymalnym przybliżeniu  $\times 200$ ). Jednostkę mikroskopu oraz obiektyw przedstawiono na rysunku 4.25. Mikroskop wykonywał zdjęcia w jakości 4K.



**Rys. 4.25.** Jednostka mikroskopu cyfrowego oraz obiektyw Keyence VH×-7000 series

Źródło: Materiały własne

Próbki do badania przy wykorzystaniu mikroskopu cyfrowego były pozyskiwane po badaniu wytrzymałości na zginanie przedstawionej w pkt. 4.4 lub po przełamaniu mechanicznym próbki. Próbki

na potrzeby badania zostały wybrane tak, aby nie miały jednolitej struktury przełamu. W przypadku braku takiej struktury dokonano ponownego przełamu. Badanie próbek przy wykorzystaniu mikroskopu cyfrowego dotyczyło próbek referencyjnych i próbek pobranych z badania wielkoskalowego po oddziaływania pożarem. Przykładowe próbki poddane badaniom przedstawiono na rysunku 4.26.

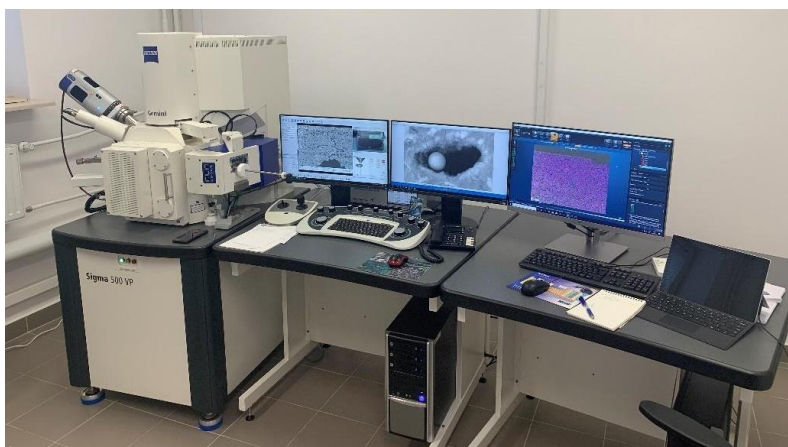


**Rys. 4.26.** Przykładowe próbki poddane badaniom pod mikroskopem cyfrowym

Źródło: Materiały własne

#### **4.6 Stanowisko badawcze z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego**

Celem zweryfikowania struktury przełamu oraz zglądu wykonano badania mikroskopem skaningowym firmy Carl Zeiss model Sigma 500 VP. Mikroskop skaningowy przedstawiono na rysunku 4.27.

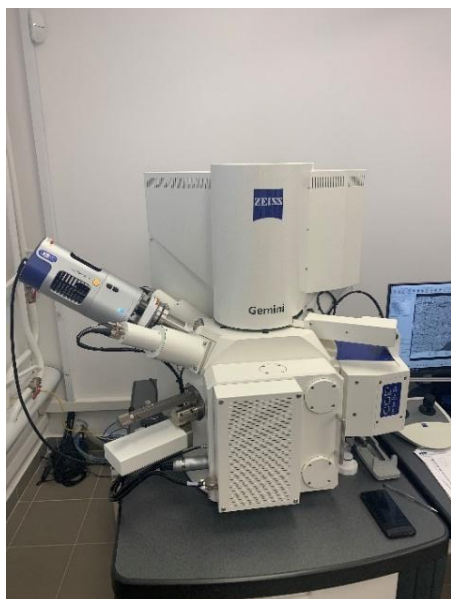


**Rys. 4.27.** Mikroskop skaningowy firmy Carl Zeiss model Sigma 500 VP

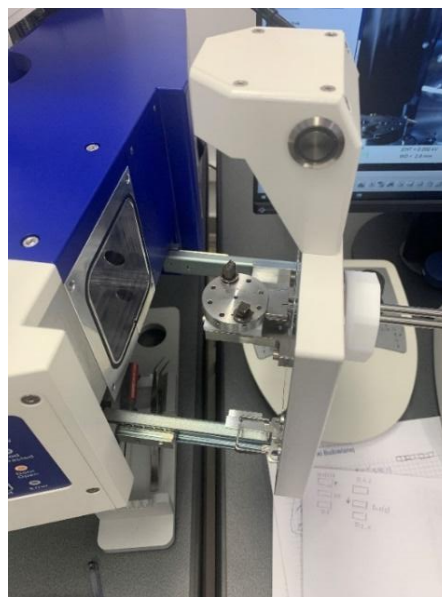
Źródło: Materiały własne

Obraz zarejestrowano z detektorów SE oraz BSD, model Ultim Max 40 firmy Oxford Instruments z oprogramowaniem AztekLive. Urządzenie wraz z detektorami i komorą badawczą przedstawiono na rysunku 4.28.





a)



b)

**Rys. 4.28.** Elektronowy mikroskop skaningowy firmy Carl Zeiss model Sigma 500 VP: a) urządzenie;  
b) komora badawcza

Źródło: Materiały własne

Próbki przed badaniem były naporowywane złotem przy wykorzystaniu urządzenia Quorum Q 150R ES, co przedstawiono na rysunku 4.29.

Do badań przygotowano próbki w postaci zgładów oraz przełamów. Przykładowe próbki przedstawiono na rysunku 4.30.



**Rys. 4.29.** Quorum Q 150R ES do naporowania złotem próbek

Źródło: Materiały własne



**Rys. 4.30.** Próbkki zglądów do badania mikroskopem skaningowym

Źródło: Materiały własne

#### 4.7 Ocena stopnia destrukcji płyt włóknisto-cementowych

Celem identyfikacji modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożaru należało najpierw przyjąć odpowiednią klasyfikację oraz określić stopień destrukcji próbek pozyskanych z badań wielkoskalowych po oddziaływaniu pożarem.

W niniejszej pracy do oceny stopnia destrukcji płyt włóknisto-cementowych wykorzystano kryteria oraz główne założenia metody opracowanej przez Szymkova [161]. Szymków w pracy [161] podał trzy stopnie destrukcji w zależności od parametrów wytrzymałościowych: wytrzymałość na zginanie ( $MOR$ ) oraz pracy łamania ( $W_f$ ). Opracowana w ramach niniejszej rozprawy autorska metoda polega na określeniu parametrów charakterystycznych: wytrzymałości na zginanie  $MOR$ , pracy łamania  $W_f$ , granicy proporcjonalności  $LOP$  i wartości modułu Younga  $E_D$  oraz wykonaniu badania doświadczalnego metodą nieniszczącą przy wykorzystaniu mikroskopu skaningowego SEM i przy wykorzystaniu mikroskopu cyfrowego. Na podstawie wytrzymałości na zginanie  $MOR$  i pracy łamania  $W_f$  próbek płyt włóknisto-cementowych pozyskanych z modelu wielkoskalowego przypisano ich stopień destrukcji zgodnie z granicznymi wartościami przedstawionymi poniżej do jednej z poniższych kategorii:

- nieistotna destrukcja (spełnienie warunków: praca łamania  $W_f$ :  $U_L > 0,85$ , wytrzymałość na zginanie  $MOR$ :  $R_L > 0,75$ );
- istotna destrukcja (spełnienie warunków: praca łamania  $W_f$ :  $U_L < 0,85$ ; wytrzymałość na zginanie  $MOR$ :  $R_L > 0,75$ );
- krytyczna destrukcja (niespełnieniem warunku wytrzymałości na zginanie  $MOR$ :  $R_L > 0,75$ ).

Następnie wykonano weryfikację czy pozostałe parametry tj. granicy proporcjonalności *LOP* i wartości modułu Younga  $E_D$  oraz przebieg wykresów w zakresie wytrzymałości, są zbieżne z określonym stopniem destrukcji, ostatecznie akceptując lub zmieniając wcześniej przypisany stopień destrukcji. Po dokonaniu przypisania stopnia destrukcji odpowiednim próbkom poddanym oddziaływaniu pożarem, kolejnym krokiem była identyfikacji modelu zniszczenia elewacji wentylowanej o okładzinach z płyt włóknisto-cementowych.

## 4.8 Metodyka badań

Zakres badań własnych i analiza uzyskanych rezultatów obejmowały :

1. Przygotowanie modeli wielkoskalowych.
2. Przeprowadzenie badań własnych dla elewacji wentylowanych na modelach wielkoskalowych (modelach rzeczywistej elewacji i budynku modelowym).
3. Analiza przebiegu badań wielkoskalowych wraz z opisaniem elementów okładzin odpadających w trakcie badania.
4. Opracowanie lokalnych map rozkładu temperatur dla badań na modelach wielkoskalowych.
5. Opracowanie globalnych map rozkładu temperatur dla badań na modelach rzeczywistych w zakresie oddziaływania pożarem.
6. Porównanie badań na modelach rzeczywistych z badaniami na rzeczywistych elewacjach w budynkach modelowych w zakresie oddziaływania pożarem.
7. Przygotowanie próbek referencyjnych w zakresie materiału kompozytowego – płyt włóknisto-cementowych do dalszych badań.
8. Pozyskanie próbek poddanych oddziaływaniu pożarem z modeli wielkoskalowych w zakresie materiału kompozytowego – płyt włóknisto-cementowych do dalszych badań.
9. Przeprowadzenie badań, w tym wytrzymałościowych i optycznych, na próbkach płyt włóknisto-cementowych.
10. Opis zniszczenia płyt włóknisto-cementowych w zakresie fazy matrycy cementowej i fazy rozproszonej w oddziaływaniu pożarem na modelach wielkoskalowych.
11. Opracowanie globalnych map destrukcji elewacji dla badań na modelach rzeczywistych w zakresie oddziaływania pożarem.
12. Określenie krytycznej strefy dla okładzin elewacyjnych na podstawie matrycy temperatur wskazującej istotną oraz krytyczną destrukcję.
13. Identyfikacja stopnia destrukcji i modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożarem.
14. Identyfikacja globalnego problemu odpadania elementów okładzin elewacyjnych w warunkach oddziaływania pożaru.
15. Opracowanie wniosków końcowych.

#### 16. Podanie kierunków dalszych badań.

Zakres przeprowadzonych badań własnych obejmuje dziesięć serii badań – od A do J, w których głównym wyrobem budowlanym poddanym analizie były okładziny elewacyjne wykonane z płyt włóknisto-cementowych. Wszystkie płyty włóknisto-cementowe były materiałem przystosowanym do zastosowań zewnętrznych jako okładziny elewacyjne. Płyty poszczególnych serii różnią się parametrami technicznymi, składem, technologią produkcji i obszarem zastosowania oraz stanowią reprezentatywną próbę dostępnych na rynku budowlanym tego typu wyrobów budowlanych. Z uwagi na złożoność badań, część serii została wykonana z innych materiałów okładzinowych. Wyniki z okładzin innych niż płyt włóknisto-cementowych zostały wykorzystane tylko wyłącznie w zakresie globalnej analizy zjawisk, tj. opracowanie globalnych map temperatury i na podstawie ich opracowanie map destrukcji elewacji.

## **5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA**

### **5.1 Opis przebiegu badań na modelach wielkoskalowych**

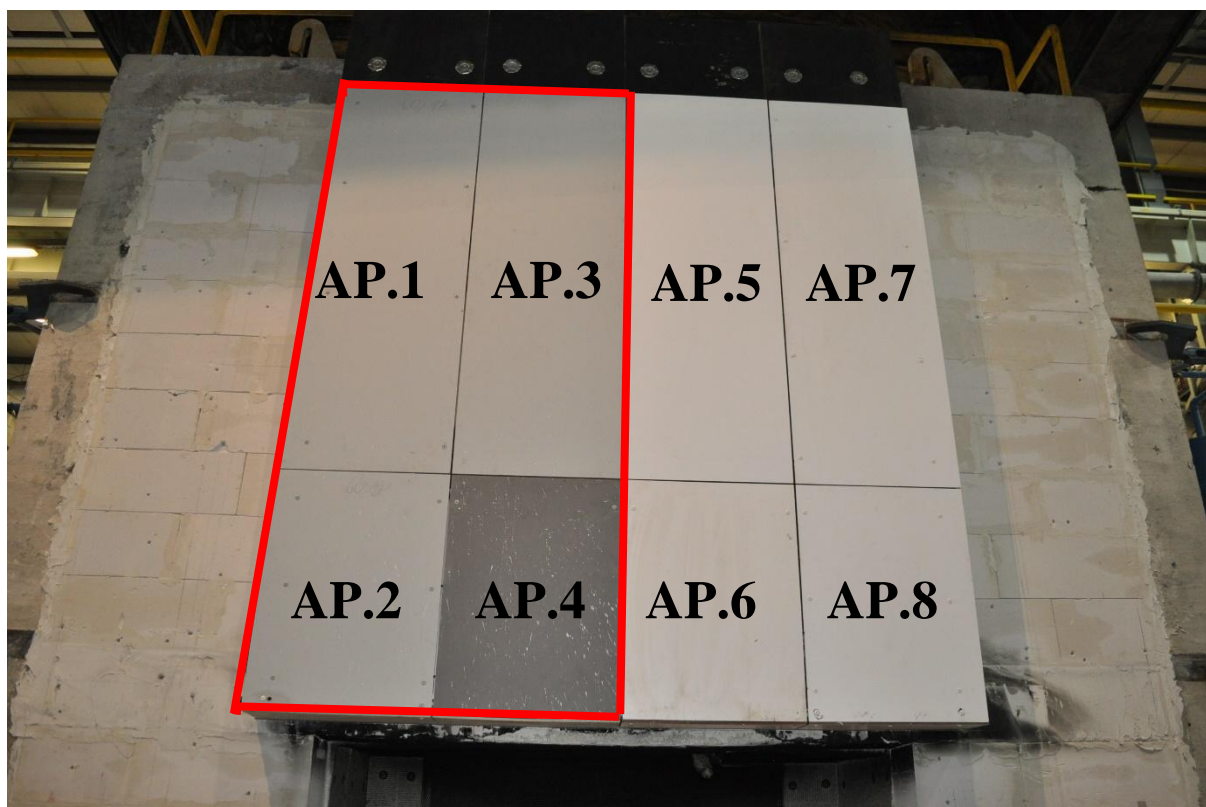
Poniżej przedstawiono przebieg badań własnych dla elewacji wentylowanych na modelach wielkoskalowych w zakresie oddziaływania pożarem. Zakres przeprowadzonych badań obejmował łącznie dziesięć serii oznaczonych od A do J, z czego osiem serii było przeprowadzonych na modelach rzeczywistych elewacji (serie A-E, H-J), a dwa na budynkach modelowych (serie F i G). Początkowo opisano poszczególne serie badań i zawarte w nich rozwiązania konstrukcyjne. Wszystkie zdarzenia występujące w trakcie badania dokładnie opisano z odniesieniem do czasu jego trwania tj. odpadanie elementów okładzin elewacyjnych, pęknięcia itd.

Kolejno na podstawie wyników z termopar opracowano lokalne mapy rozkładu temperatur dla badań na modelach wielkoskalowych. Lokalne mapy umożliwiły porównanie zdarzeń jakie zachodziły na elewacji z dokładnymi temperaturami panującymi w ich strefie. Na podstawie lokalnych map rozkładu temperatur dla pojedynczych serii badań opracowano globalne mapy rozkładu temperatur, które to były zbiorczym zestawieniem lokalnych map temperatury dla płyt włóknisto cementowych i innych wybranych materiałów niepalnych (celem rozszerzenia ilości danych temperaturowych).

Ostatnim elementem było porównanie badań na modelach rzeczywistych z badaniami na elewacjach w budynku modelowym w zakresie oddziaływania pożarem. Porównanie dokonano na podstawie wcześniej przeprowadzonej analizy przebiegu badań wielkoskalowych oraz na podstawie opracowanych lokalnych i globalnych map temperatur.

#### **5.1.1 Seria badań A – model rzeczywisty elewacji**

Seria badań A zawierała okładzinę elewacyjną wykonaną z HPL oraz z płyt włóknisto-cementowych. Na rysunku 5.1 czerwonymi liniami oznaczono strefę, w której znajdowały się płyty włóknisto-cementowe o parametrach przedstawionych jak w tabeli 4.2. Płyty AP.1, AP.2, AP.7, AP.8 były mocowane w sposób mechaniczny (za pomocą nitów), płyty AP.3, AP.4, AP.5, AP.6 były mocowane w sposób adhezyjny poprzez klej przeznaczony do takiego zastosowania. Glif częściowy został zamocowany w sposób mechaniczny oraz adhezyjny. W przypadku płyt AP.4, AP.6, poza mocowaniem w sposób adhezyjny za pomocą kleju, w górnej części wykonano połączenie z podkonstrukcją za pomocą nitów (jeden rząd). Minimalna szerokość pustki powietrznej pomiędzy warstwą wełny mineralnej a okładziną elewacyjną wynosiła 20 mm. Model serii A nie był wyposażony w termopary.



**Rys. 5.1.** Model rzeczywisty elewacji wentylowanej dla serii badań A

Badanie rozpoczęto od uruchomienia palnika i wyzerowania czasu. Kluczowe elementy przebiegu badania przedstawiono poniżej:

0'00''	–	rozpoczęcie badania
0'30''	–	pękanie nagrzewanych płyt
1'35'' – 5'20''	–	spadają drobne fragmenty wierzchniej warstwy płyty AP.4, niektóre spadające elementy nadal się palą
8'30''	–	spadają drobne fragmenty płyty AP.3, AP.4, AP.5, AP.6
11'20'' – 12'40''	–	wytapia się ruszt aluminiowy spod płyty AP.4 i AP.6
15'30''	–	pojawia się ogień nad płytą AP.6 w przestrzeni wentylacyjnej
19'30'' – 26'50''	–	spadają drobne fragmenty płyty AP.5 i AP.6
26'50''	–	spadają fragmenty płyt AP.5 i AP.6, niektóre palą się po upadku
28'00''	–	spadają fragmenty płyt AP.5 i AP.8
28'30''	–	spadają pozostałości płyty AP.5 o wadze ok. 5 kg, po odpadnięciu nadal się palą
30'00'' – 60'00''	–	spadają drobne fragmenty płyty AP.7 i AP.8
32'00''	–	spada płyta AP.3 w całości
50'00''	–	palą się wierzchnia warstwa płyty AP.7
60'00''	–	koniec badania.

Na rysunku 5.2 przedstawiono fotografie z przebiegu badania modelu rzeczywistego w kolejnych minutach.





**Rys. 5.2.** Przebieg badania modelu rzeczywistego w teście skali naturalnej serii badań A: a) 15'30" – widoczna duże zniszczenie płyty AP.4; b) 22'00" – znacząca zniszczenie płyty AP.6; c) 22'00" – widoczne jest różne zachowanie się materiałów na elewacji; d) 28'00" – spadają całe elementy płyt AP.5 i AP.6; e) 36'00" – widoczny rozwój zniszczenia w płytach AP.7 i AP.8; f) 45'00" – spadają kolejne elementy; g) widok okładziny elewacyjnej po badaniu; h) widok okładziny elewacyjnej po badaniu; i) widok okładziny elewacyjnej po badaniu, widoczny nit przytrzymujący płytę AP.4 przed odpadnięciem w całości



Płyty włóknisto-cementowe montowane w sposób adhezyjny w serii badań A wykazały znaczne niebezpieczeństwo i problematykę występowania odpadających elementów elewacji w warunkach pożaru. Płyty AP.3 i AP.5 spadały w całości bądź w dużych, stanowiących niebezpieczeństwo elementach, co wskazuje, iż zastosowanie systemu opartego jedynie o klej stanowi zagrożenie dla osób znajdujących się w pobliżu elewacji w przypadku jej pożaru. Płyty odpadały w czasie 28'30" – 32'00" minuty. Płyty montowane w sposób adhezyjny z zastosowaniem dodatkowego pojedynczego rzędu nitów takie połączenia wykazywały mniejsze niebezpieczeństwo niż w przypadku zastosowania jedynie montażu adhezyjnego, lecz nadal nie było ono wystarczające, ażeby określić je jako bezpieczne (rysunek 5.2).

### 5.1.2 Seria badań B – model rzeczywisty elewacji

Seria badań B zawierała okładzinę elewacyjną wykonaną z materiałów ceramicznych oraz materiałów kompozytowych - warstwowych. Model rzeczywisty elewacji dla serii B przedstawiono na rysunku 5.3. Czerwonymi liniami oznaczono strefę, w której znajdowały się okładziny zewnętrzne ceramiczne. Płyty BP.1, BP.2, BP.3, BP.5, BP.7, BP.8 były mocowane w sposób adhezyjny, płyty BP.4, BP.6, były mocowane w sposób łączony adhezyjny z elementami łączników mechanicznych. Dla serii B zastosowano termopary.



**Rys. 5.3.** Model rzeczywisty elewacji wentylowanej dla serii badań B

Badanie rozpoczyna się od uruchomienia palnika i wyzerowania czasu. Kluczowe elementy przebiegu badania przedstawiono poniżej:

- 0'00'' – rozpoczęcie badania
- 1'30'' – trzaski płyt, warstwa wierzchnia płyty BP.6 żarzy się
- 5'00'' – widoczny ogień nad płytami BP.3 i BP.5 przedostający się przestrzenią wentylacyjną
- 6'00'' – spadające elementy glifu, płyta BP.6 odkształca się
- 8'00'' – spadające fragment płyty BP.4 o wadze ~ 0,5 kg
- 23'00'' – spadające fragmenty płyty BP.4
- 43'00'' – spadające fragment płyty BP.4 o wadze ~ 0,8 kg
- 46'00'' – spadające fragment glifu o wadze ~ 1,1 kg
- 60'00'' – koniec badania.

Na rysunku 5.4 przedstawiono fotografie z przebiegu badania modelu rzeczywistego w kolejnych minutach badania.





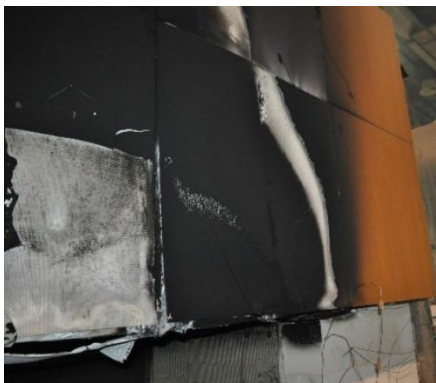
e)



f)



g)



h)



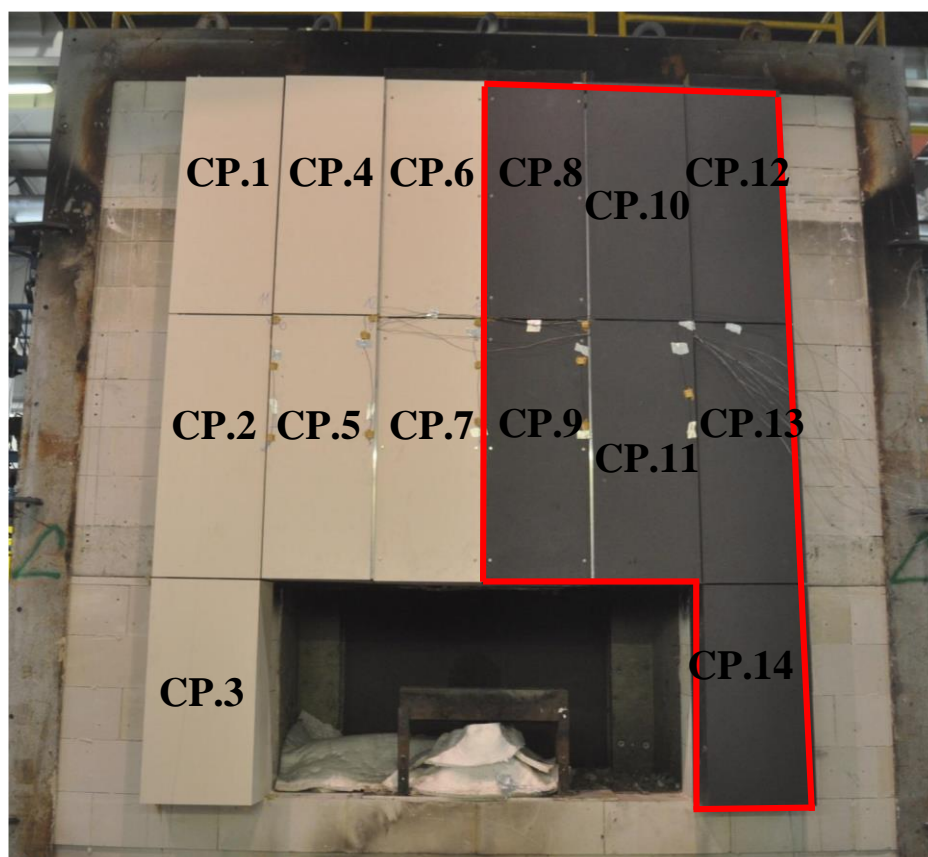
i)

**Rys. 5.4.** Przebieg badania modelu rzeczywistego w teście skali naturalnej serii badań B: a) 5'00"; b) 6'00"; c) 15'00"; d) 20'00"; e) 45'00"; f) 59'00"; g) widok okładziny elewacyjnej po badaniu; h) widok okładziny elewacyjnej po badaniu; i) widok okładziny elewacyjnej po badaniu

W serii badań B w przeciwieństwie do serii badań A w zakresie płyt montowanych w sposób adhezyjny (z elementami łączników mechanicznych) uzyskano dużo większe bezpieczeństwo montażu elewacji, uniemożliwiając odpadanie z niej większych elementów, lecz nie likwidując całkowicie tego problemu. Płyty najbardziej narażone na oddziaływanie płomieniami (BP.4 i BP.6), tak samo jak w przypadku serii A, zostały dodatkowo wzmocnione łącznikami mechanicznymi, co niewątpliwie miało wpływ na ograniczenie ewentualnego odpadania elementów. Seria B w badaniu na modelu rzeczywistym wykazała dobrą wytrzymałość elewacji w warunkach pożaru i nieduże zniszczenia okładziny zewnętrznej, ograniczając, ale nie całkowicie uniemożliwiając odpadanie części elementów elewacji (rysunek 5.4.).

### 5.1.3 Seria badań C – model rzeczywisty elewacji

Seria badań C zawierała okładzinę elewacyjną wykonaną z HPL oraz płyt włóknisto-cementowych. Na rysunku 5.5 czerwonymi liniami oznaczono strefę, w której znajdowały się płyty włóknisto-cementowe o parametrach jak te przedstawione w tabeli 4.2. Płyty C.P1, C.P2, CP.3, CP.12, CP.13, CP.14 były zamocowane w sposób adhezyjny, a pozostałe w sposób mechaniczny. W przeciwieństwie do modeli w serii badań A i B zastosowano konsolle pasywne. Dla serii C zastosowano termopary.

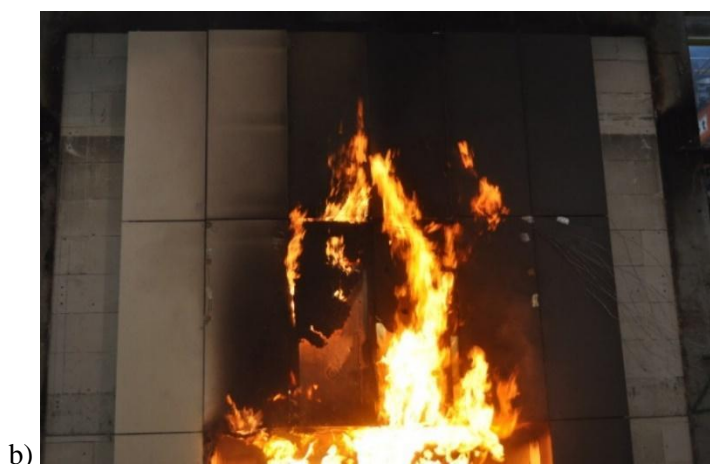


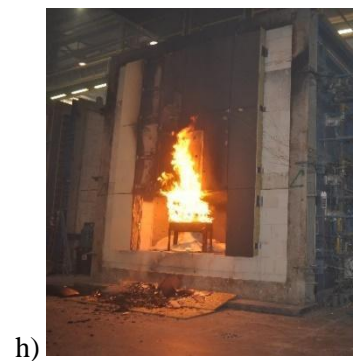
Rys. 5.5. Model rzeczywisty elewacji wentylowanej dla serii badań C

Badanie rozpoczyna się od uruchomienia palnika i wyzerowania czasu. Kluczowe elementy przebiegu badania przedstawiono poniżej:

0'00''	–	rozpoczęcie badania
0'30''	–	słyszane są pierwsze trzaski płyt
1'15''	–	płyty CP.7 i CP.9 opalają i okopcają się
2'50'' – 5'00''	–	odpadają małe odpryski płyt
5'30''	–	płyty CP.5, CP.7, CP.9 i CP.11 zostają znacząco okopcone
8'50'' – 11'30''	–	odpadają kawałki płyty CP.7
14'30''	–	odpadają kawałki płyty CP.9
15'30''	–	widoczne płomienie pod pozostałościami z płyty CP.7
16'20''	–	widoczne płomienie i okopcone części na płycie CP.6
18'10''	–	odpadają pozostałości z płyty CP.7
18'15'' – 23'00''	–	widoczne płomienie za płytą CP.6
23'00''	–	odpadają części płyty CP.5
33'00'' – 37'00''	–	płomienie oraz dalsza deformacja płyty CP.5
34'00''	–	odpada cała płyta CP.4
37'00''	–	odpadają pozostałości płyty CP.5
41'00''	–	odpadają części płyty CP.5
44'00''	–	widocznie płomienie nad płytą CP.9
60'00''	–	koniec badania.

Na rysunku 5.6 przedstawiono fotografie z przebiegu badania z kolejnych minut dla serii C.







k)



l)



m)

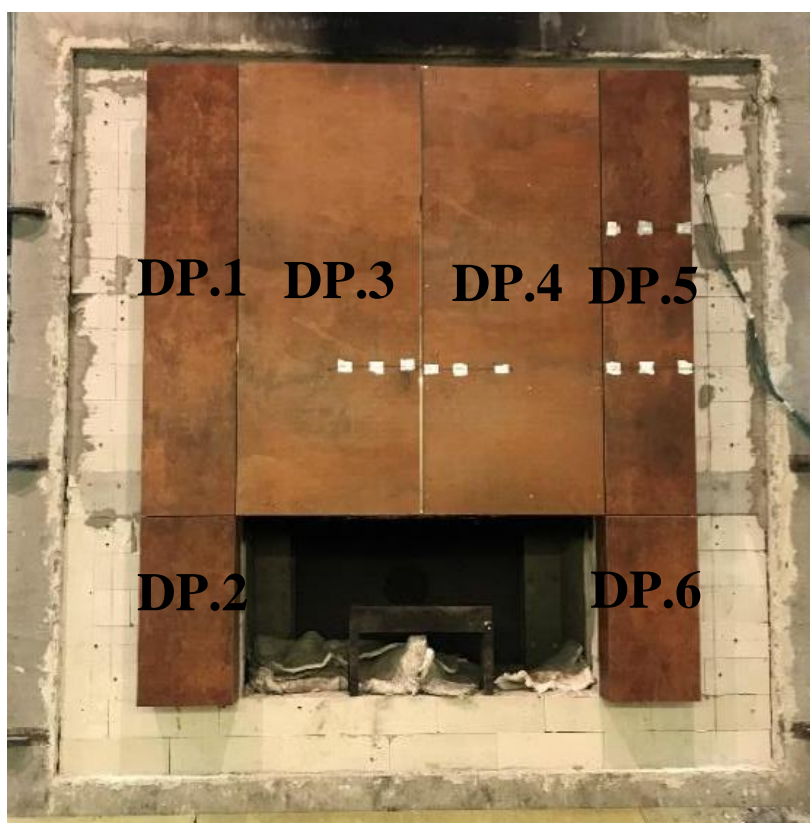
**Rys. 5.6.** Przebieg badania modelu rzeczywistego w teście skali naturalnej serii badań C: a) 4'00"; b) 15'00"; c) 15'00"; d) 25'00"; e) 25'00"; f) 33'00"; g) 37'00"; h) 42'00"; i) 47'00"; j) 47'00"; k) widok okładziny elewacyjnej po badaniu; l) widok okładziny elewacyjnej po badaniu; m) widok okładziny elewacyjnej po badaniu

W serii badań C wykorzystano częściowo jako okładziny zewnętrzne materiały palne HPL. Pomimo zastosowania montażu mechanicznego płyta CP.4 wykonana z HPL odpadła w całości, mogąc spowodować ogromne zagrożenie w przypadku prowadzenia akcji ratowniczych. Okładzina wykonana z materiałów palnych uległa dużo większym zniszczeniom podczas badania. Mocowanie w sposób mechaniczny płyty CP.9 spowodowało ograniczenie odpadania elementów

o znacznych gabarytach, redukując powstawanie możliwego zagrożenia podczas ewakuacji. Płyty włóknisto-cementowe na modelu tej serii wykazują duże mniejszą zniszczenia aniżeli płyty HPL.

#### 5.1.4 Seria badań D – model rzeczywisty elewacji

W serii badań D okładzina elewacyjna wykonana były w całości z płyt włóknisto-cementowych. Model rzeczywisty przygotowany do badania przedstawiono na rysunku 5.7. Zamontowane płyty miały parametry tak jak przedstawiono to w tabeli 4.2. Płyty DP.3 i DP.4 były zamocowane w sposób mechaniczny. W płycie DP.3 wykorzystano kotwy tylni-nacinające, a w płycie DP.4 nity. W pozostałych płytach zastosowano montaż na klej przeznaczony do tego typu połączeń. Podkonstrukcje częściowo wykonano jako profile pionowe oraz jako profile pionowe i poziome (podkonstrukcja krzyżowa). Dla serii D zastosowano termopary.



Rys. 5.7. Model rzeczywisty elewacji wentylowanej dla serii badań D

Badanie rozpoczyna się od uruchomienia palnika i wyzerowania czasu. Kluczowe elementy przebiegu badania przedstawiono poniżej:

- 0'00'' – rozpoczęcie badania
- 1'40'' – 9'10'' – powstają pęknięcia oraz spadają drobne części płyt w obrębie najbardziej narażonych stref (nad paleniskiem) – płyty DP.3 i DP.4



- 9'30'' – 12'00'' – wytapia się aluminium z podkonstrukcji
- 13'30'' – spada pierwszy element o większych gabarytach – ok. 0,5 kg zlokalizowany bezpośrednio nad paleniskiem z płyty DP.4 (pobrano go jako próbkę D5)
- 17'00'' – spadają elementy glifu zlokalizowanego równoległe do kierunku płomienia (pobrano je jako próbkę D1/D2)
- 17'15'' – spadają elementy zlokalizowane 0,6 – 0,8 m z płyty DP.4 powyżej paleniska (pobrano je jako próbkę D4)
- 34'00'' – spadają elementy zlokalizowane 0,8 – 1,0 m z płyty DP.4 powyżej paleniska (pobrano je jako próbkę D3)
- Po badaniu (60'00'') – spadają elementy zlokalizowane powyżej 1,2 m z płyty DP.4 nad paleniskiem (pobrano je jako próbkę D6).

Na rysunku 5.8 przedstawiono fotografie z przebiegu badania modelu rzeczywistego w kolejnych minutach.





**Rys. 5.8.** Przebieg badania modelu rzeczywistego w teście skali naturalnej serii D: a) rozpoczęcie badania; b) 13'30" – spada pierwszy element; c) 17'00" – spadają elementy glifu; d) 28'00" – spadają kolejne elementy; e) 28'00" – duże zniszczenie okładziny; f) 55'00" – spadają kolejne elementy; g) widok okładziny elewacyjnej po badaniu

W serii D zastosowano dwa rodzaje połączeń mechanicznych w części centralnej – kotwy tylnonacinające dla płyty DP.3 oraz nity dla płyty DP.4. Okładzina elewacyjna montowana poprzez kotwy tylnonacinające wykazała dużo mniejsze zniszczenia, odpadających elementów było mniej, a ich gabaryty były mniejsze. Zastosowanie takich sposobów montażu nie zapobiegło odpadaniu elementów podczas oddziaływania pożarem.

### 5.1.5 Seria badań E – model rzeczywisty elewacji

Seria badań E zawierała okładzinę elewacyjną wykonaną z okładzin ceramicznych i płyt włóknisto-cementowych. Na rysunku 5.9 czerwonymi liniami oznaczono strefę, w której znajdowały

się płyty włóknisto-cementowe o parametrach jak w tabeli 4.2. Płyty EP.1 i EP.2 były mocowane w sposób mechaniczny (system wieszakowy), płyta EP.4 była mocowana systemem łączonym (system mechaniczny (nity) + system adhezyjny (klej)), pozostałe płyty były mocowane wyłącznie systemem adhezyjnym.



**Rys. 5.9.** Model rzeczywisty elewacji wentylowanej dla serii badań E

Badanie rozpoczyna się od uruchomienia palnika i wyzerowania czasu. Kluczowe elementy przebiegu badania przedstawiono poniżej:

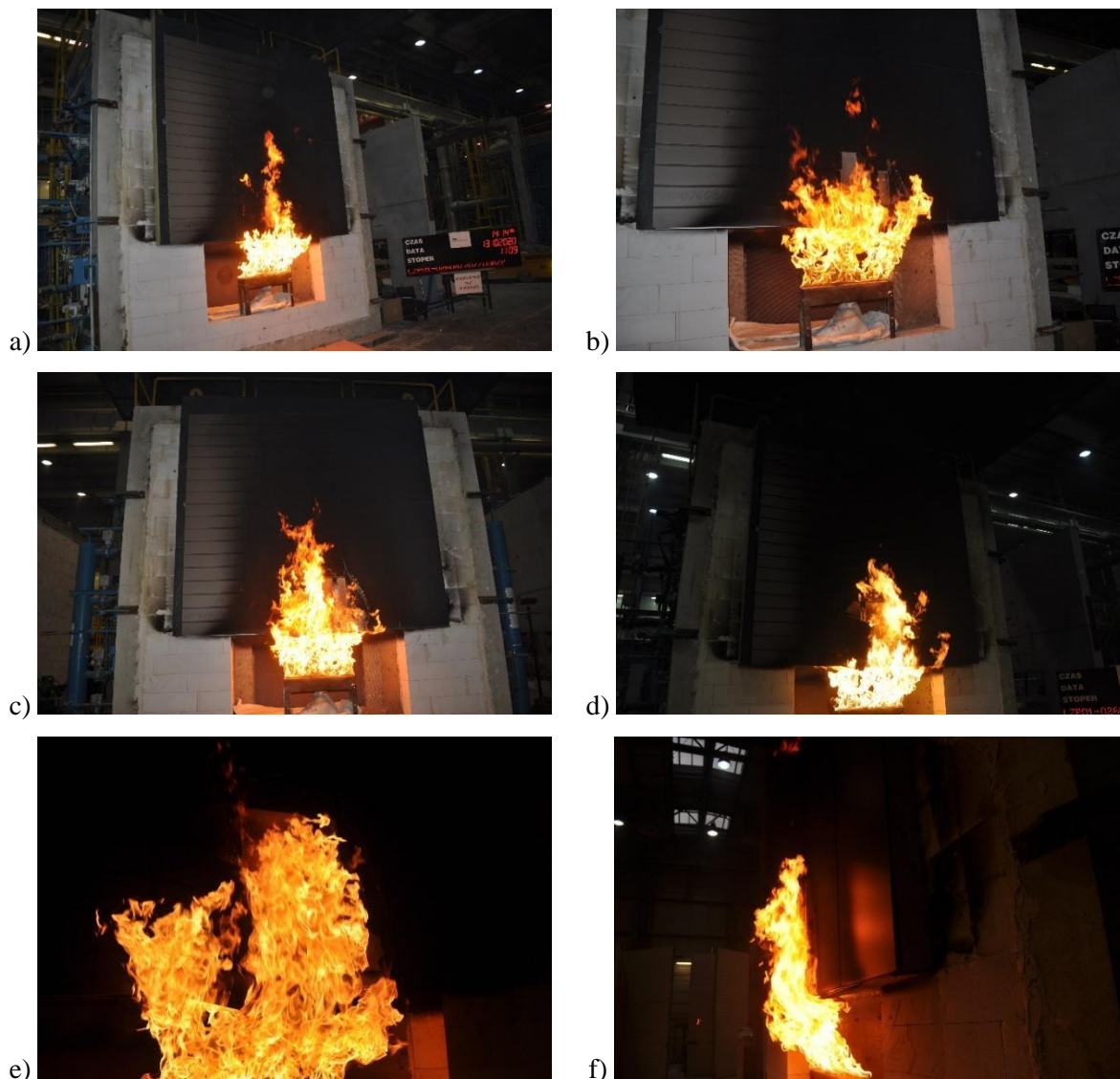
- |                   |   |  |
|-------------------|---|--|
| 0'00''            | – | rozpoczęcie badania  |
| 0'50''            | – | odpadają drobne fragmenty płyty EP.6   |
| 2'30'' – 5'30''   | – | spadają fragmenty płyt EP.1 i EP.2 w zakresie 30 cm nad paleniskiem  |
| 15'30''           | – | spadają fragmenty płyt EP.1 i EP.2 w zakresie 30 – 60 cm nad paleniskiem                                     |
| 16'30'' – 25'10'' | – | wytapia się aluminium z podkonstrukcji   |
| 30'00''           | – | spadają kolejne fragmenty płyt EP.1 i EP.2 w zakresie 30 – 60 cm nad paleniskiem, największy o wadze ~1,5 kg |
| 45'30''           | – | spada fragmenty płyty EP.2 na wysokości 60 cm nad paleniskiem o  |

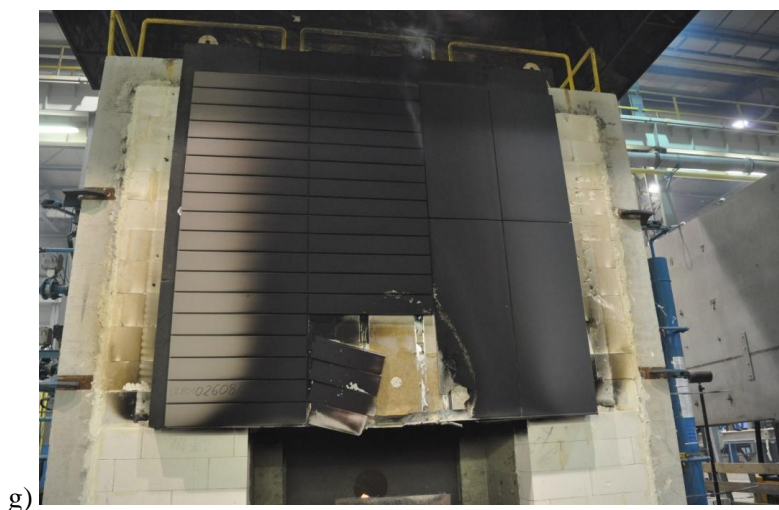
wadze ~4,8 kg

60'00"

– koniec badania.

Na rysunku 5.10 przedstawiono fotografie z przebiegu badania modelu rzeczywistego w kolejnych minutach.

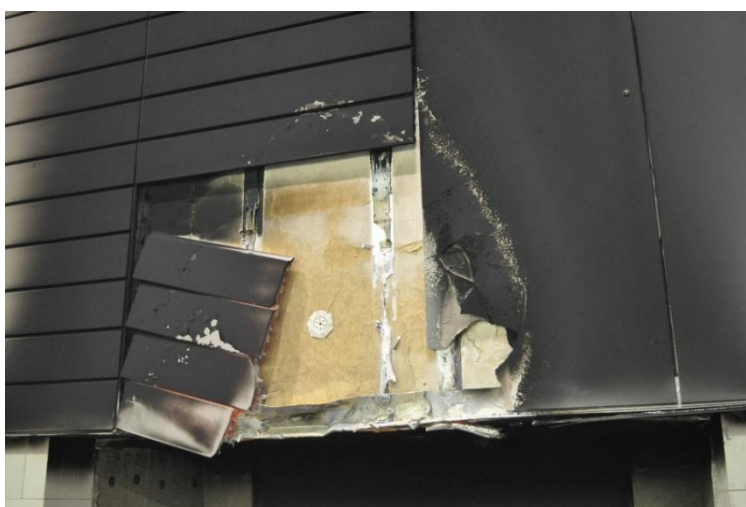




g)



h)



i)

**Rys. 5.10.** Przebieg badania modelu rzeczywistego w teście skali naturalnej serii E: a) 11'00"; b) 15'00"; c) 32'00"; d) 46'00"; e) 59'00"; f) 59'00"; g) – i) widok okładziny elewacyjnej po badaniu

Montaż płyt włóknisto-cementowych w serii E w porównaniu do pozostałych serii badań wykazał dużą niezawodność w przypadku oddziaływania pożarem – odpadające elementy były małe i nie stanowiły większego zagrożenia dla osób postronnych. Zastosowano tam system łączony – mechaniczny (nity) + adhezyjny. Widok modelu rzeczywistego po badaniu przedstawiono na rysunku 5.10. i). W przypadku montażu okładzin ceramicznych wyniki nie były już tak pozytywne. Największy odpadający element ważył 4,8 kg. Tak duży element stanowi zagrożenie w przypadku ewentualnej akcji ratunkowej.

### 5.1.6 Seria badań F – elewacja na modelowym budynku

Seria badań F zawierała okładzinę elewacyjną wykonaną z płyt wiórowo-cementowych i włóknisto-cementowych zamontowanych na budynku modelowym. Na rysunku 5.11 przedstawiono badaną elewację zainstalowaną na ścianie budynku modelowego przeznaczonego wyłącznie do celów

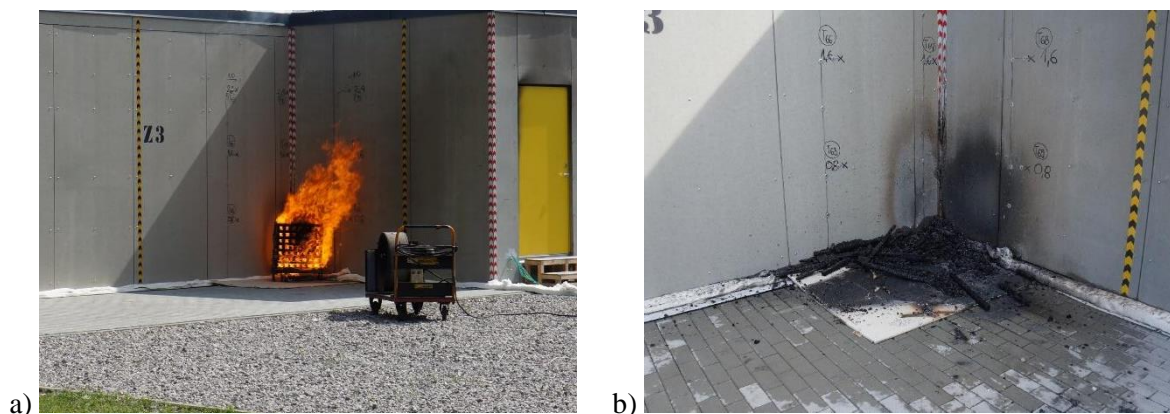
badawczych. Wszystkie płyty były mocowane w sposób mechaniczny. Jako źródło ognia (palenisko) zastosowano belki drewniane o łącznej masie 40 kg. Pogoda podczas badania była bardzo wietrzna.

Badanie rozpoczęło się od podpalenia belek drewnianych. Badanie trwało około 13'30" minut – aż do wypalenia wszystkich belek drewnianych. Na rysunku 5.12 przedstawiono przebieg badania.

Po badaniu żarzące się elementy ugaszono wodą. Zniszczenia okładziny nie była znaczące widoczne były jedyne elementy przebarwione, nie było elementów które wykazywałyby całkowite wykorzystanie nośności.



**Rys. 5.11.** Budynek i część elewacji poddana badaniu dla serii badań F



**Rys. 5.12.** Przebieg badania na budynku modelowy serii badań F: a) faza rozwiniętego pożaru;  
b) widok po badaniu

### 5.1.7 Seria badań G – elewacja na modelowym budynku

Seria badań G zawierała okładziny zewnętrzne wykonane wyłącznie z płyt wiórowo-cementowych, zamontowana była na budynku modelowym. Na rysunku 5.13 przedstawiono badaną elewację zainstalowaną na ścianie modelowego budynku o konstrukcji drewnianej przeznaczonego do badań. Wszystkie płyty były mocowane w sposób mechaniczny. Jako źródło ognia (palenisko) zastosowano belki drewniane o łącznej masie 40 kg. Pogoda podczas badania była bezwietrzna.



**Rys. 5.13.** Budynek i część elewacji poddane badaniu dla serii badań G

Badanie rozpoczęto od podpalenia belek drewnianych. Badanie trwało około 16 minut. Na rysunku 5.14 przedstawiono w formie zdjęć przebieg postępu badania okładziny zewnętrznej w kolejnych minutach.



a)



b)



c)



d)



e)



f)



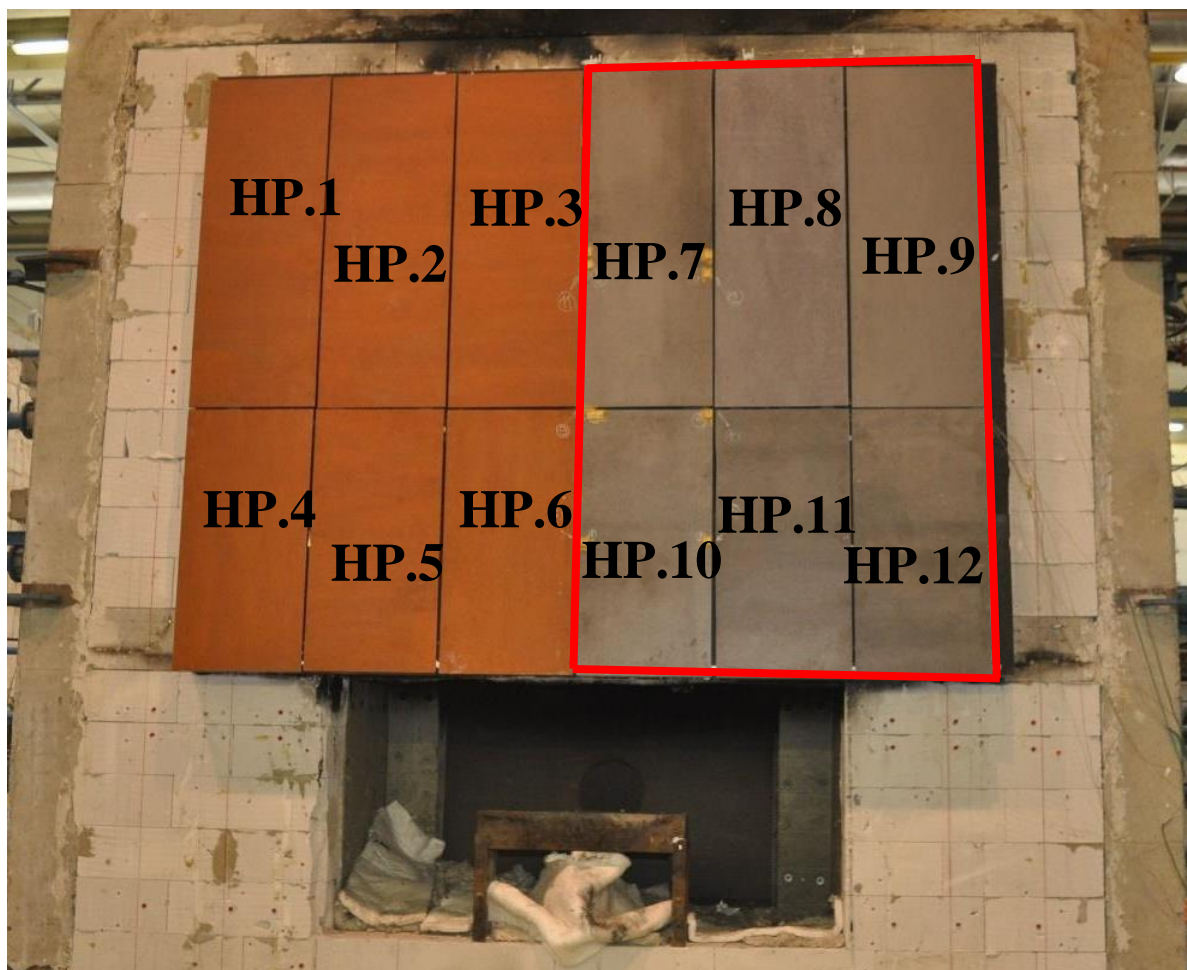


**Rys. 5.14.** Przebieg badania modelu rzeczywistego w teście skali naturalnej serii G: a) 1'00" badania; b) 2'00" badania; c) 3'00" badania; d) 4'00" badania; e) 7'00" badania; f) 8'00" badania; g) 9'00" badania; h) 13'00" badania; i) 14'00" badania

Po badaniu żarzące się elementy ugaszono wodą. Widoczne były znaczące wybrzuszenia na okładzinie elewacyjnej oraz pęknięcia spowodowane znaczącą różnicą temperatury. Pożar rozpoczął się powyżej dolnej szczeliny pozwalającej na dostawanie się powietrza do pustki powietrznej, wobec czego niemożliwe było dostanie się tam płomieni. Ponadto, ugaszenie przy użyciu wody żarzących się belek drewnianych przy jednoczesnej otwartej strukturze płyt wiórowo-cementowych pogłębiło efekt wybrzuszenia. Woda dostała się wewnątrz płyt.

### 5.1.8 Seria badań H – model rzeczywisty elewacji

Dla serii badań H zastosowano okładzinę elewacyjną wykonaną z płyt włóknisto-cementowych i płyt HPL. Model rzeczywisty badanej elewacji wentylowanej przedstawiono na rysunku 5.15. Wszystkie płyty serii były mocowane poprzez system adhezyjny. Ponadto w płytach HP.6 i HP.10 zastosowano dodatkowo na górze jeden rząd kotew tylnio-nacinających. Parametry płyt włóknisto-cementowych przedstawiono w tabeli 4.2.



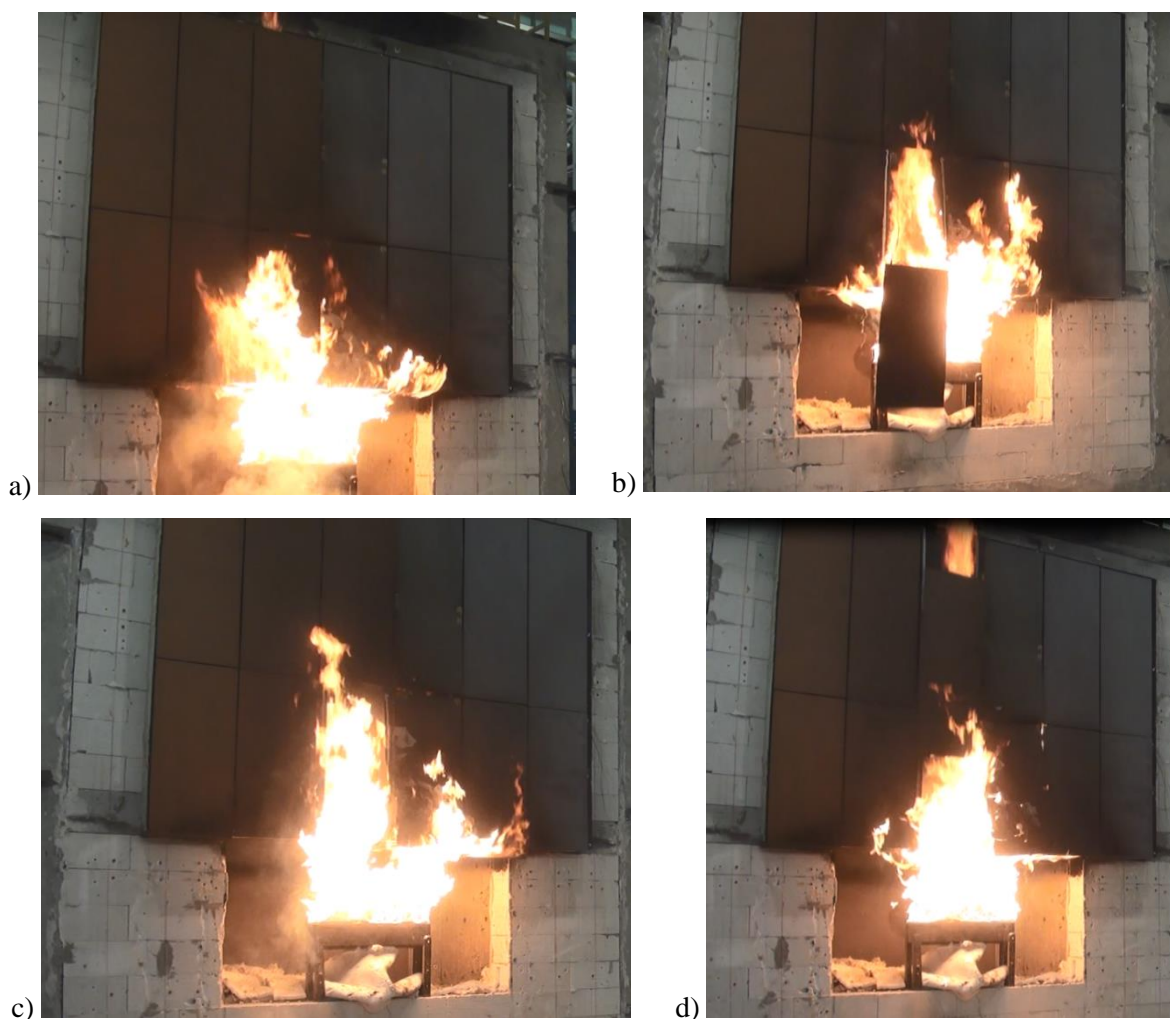
**Rys. 5.15.** Model rzeczywisty elewacji wentylowanej dla serii badań H

Badanie rozpoczyna się od uruchomienia palnika i wyzerowania czasu. Kluczowe elementy przebiegu badania przedstawiono poniżej:

- |                 |   |  |
|-----------------|---|--|
| 0'00''          | – | rozpoczęcie badania  |
| 0'30''          | – | odpadają drobne fragmenty płyty HP.6                           |
| 1'10'' – 1'50'' | – | spadają fragmenty płyt HP.10 w wysokości 30 cm nad paleniskiem |
| 2'30''          | – | odpadają fragmenty glifu                                       |
| 3'30''          | – | odpada cała płyta HP.6   |

- 4'40" – wytapia się aluminium z podkonstrukcji
- 6'40" – odpada cała płyta HP.3
- 7'40" – odpada cała płyta HP.7
- 9'50" – odpada cała płyta HP.10
- 10'20" – 10'30" – odpadają płyty HP.2 i HP.5
- 22'00" – 120'00" – poza wypalaniem wełny i wytapianiem aluminium z podkonstrukcji inne elementy nie ulegają dalszej destrukcji
- 120'00" – koniec badania.

Na rysunku 5.16 przedstawiono fotografie z przebiegu zniszczenia okładziny zewnętrznej w kolejnych minutach badania.





**Rys. 5.16.** Przebieg badania modelu rzeczywistego w teście skali naturalnej serii badań H: a) 3'00"; b) 3'30"; c) 5'20"; d) 6'40"; e) 7'40"; f) 11'00"; g) 22'00"; h) 53'00"; i) widok okładziny elewacyjnej po badaniu

Montaż płyt włóknisto-cementowych w serii H w sposób adhezyjny nie zapewnił właściwego bezpieczeństwa. Odpadanie elementów okładzin nastąpiło poprzez utratę nośności połączenia, a nie utratę nośności okładziny elewacyjnej. Płyty odpadały w całości, gdzie ich waga przekraczała znacząco 5 kg. Zastosowanie dodatkowych kotew tylnio-nacinających nie zwiększyło znacząco bezpieczeństwa okładziny elewacyjnej w tej serii badania.

### 5.1.9 Seria badań I – model rzeczywisty elewacji

Seria badań I zawierała okładziny elewacyjne wykonane z płyt włóknisto-cementowych (IP.5 – IP.8) i spieków ceramicznych (IP.1 – IP.4). Model rzeczywisty badanej elewacji przedstawiono na rysunku 5.17. Montaż okładzin został wykonany za pomocą systemu łączonego mechanicznego i adhezyjnego. Parametry płyt włóknisto-cementowych przedstawiono w tabeli 4.2. Dla serii I zastosowano termopary.

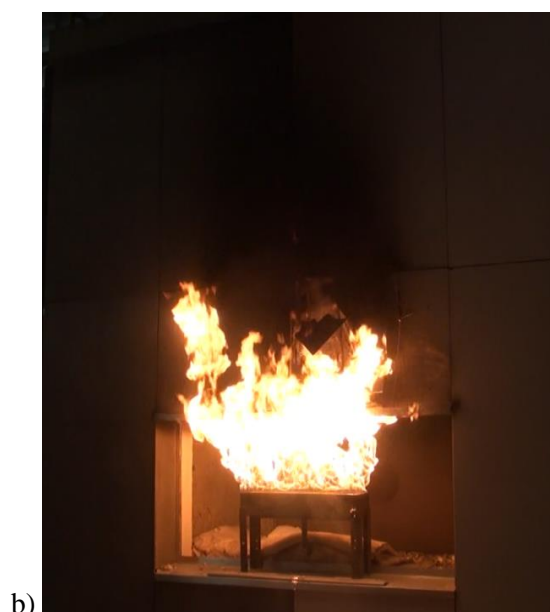


Rys. 5.17. Model rzeczywisty elewacji wentylowanej dla serii badań I

Badanie rozpoczyna się od uruchomienia palnika i wyzerowania czasu. Kluczowe elementy przebiegu badania przedstawiono poniżej:

- |                 |   |   |
|-----------------|---|---|
| 0'00''          | – | rozpoczęcie badania   |
| 3'30''          | – | odpadają drobne fragmenty płyty IP.6  |
| 5'00'' – 5'30'' | – | spadają fragmenty płyt IP.10 na całej jej wysokości nad paleniskiem                                     |
| 6'00''          | – | odpadają fragmenty płyty IP.5   |
| 8'00''          | – | zaczynają się pojawiać widoczne odkształcenia płyty IP.4  |
| 21'00''         | – | płyta IP.3 wypacza się oraz niszczy połączenia mechaniczne, którymi jest przymocowana do podkonstrukcji |
| 33'00''         | – | płyta IP.4 jest całkowicie zniszczona, zablokowanie się jej o gładki powoduje, iż nie odpada            |
| 60'00''         | – | odpada płyta IP.3 w dużych kawałkach  |
| 60'00''         | – | koniec badania.   |

Na rysunku 5.18 przedstawiono fotografie z przebiegu badania modelu rzeczywistego w kolejnych minutach.





**Rys. 5.18.** Przebieg badania modelu rzeczywistego w tęście skali naturalnej serii badań I: a) 5'00"; b) 5'30"; c) 10'40"; d) 21'00"; e) 41'00"; f) 45'00"; g) – h) widok po badaniu

Zniszczenia w tej serii badań zaszły w bardzo nietypowy sposób, tzn. część najbardziej narażona na oddziaływanie wysokimi temperaturami nie stanowiła największego zagrożenia w przypadku

odpadających elementów okładzin podczas badania. Największe zagrożenie spowodowały elementy odpadające z wyższych partii (płyta IP.3). Niewątpliwa jest w tym zasługa glifu wykonanego ze stali, który nie dopuścił płomieni do dostania się w pustkę powietrzną.

### 5.1.10 Seria badań J – model rzeczywisty elewacji

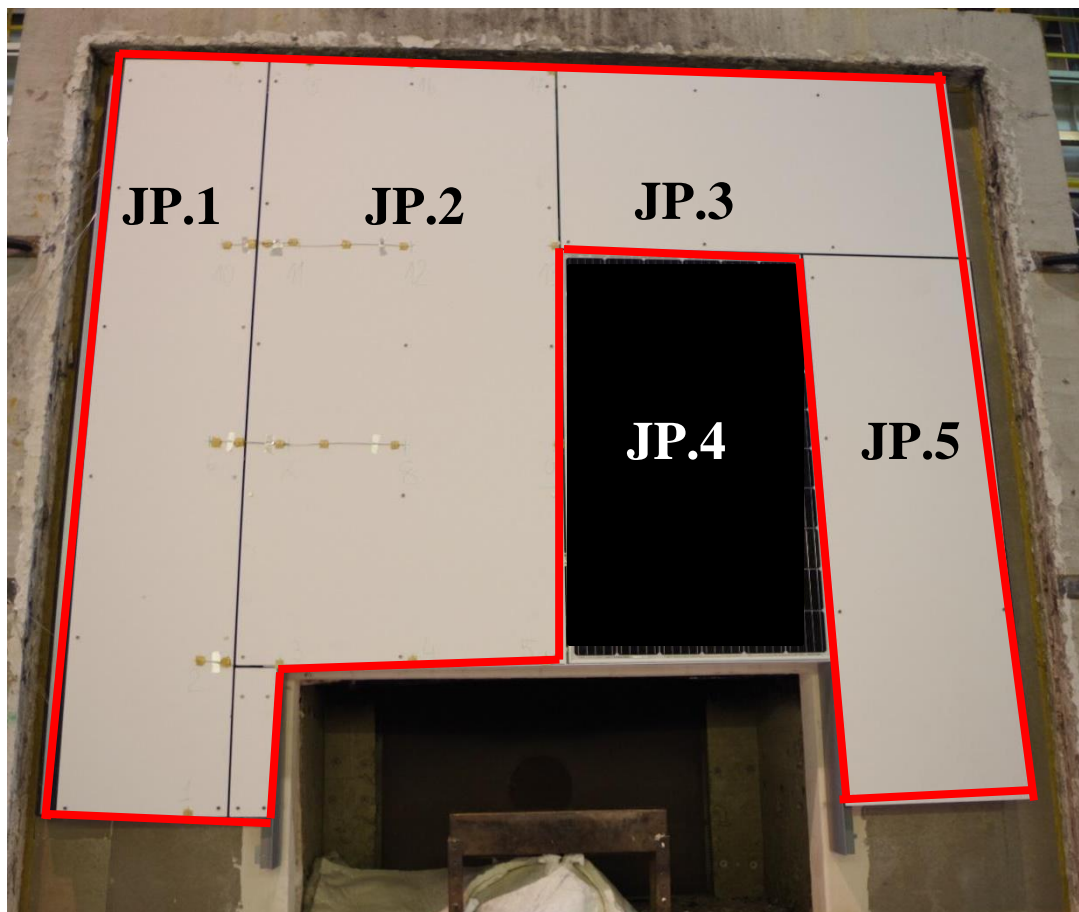
Seria badań J zawierała okładzinę elewacyjną wykonaną z płyt włóknisto-cementowych oraz innych materiałów. Model rzeczywisty badanej elewacji przedstawiono na rysunku 5.19. Okładzina elewacyjna zostały zamontowana w sposób mechaniczny. Ponadto, tak samo jak w przypadku badania serii płyt I, glif został wykonany ze stali. Seria została wyposażona w termopary.

Badanie rozpoczyna się od uruchomienia palnika i wyzerowania czasu. Kluczowe elementy przebiegu badania przedstawiono poniżej:

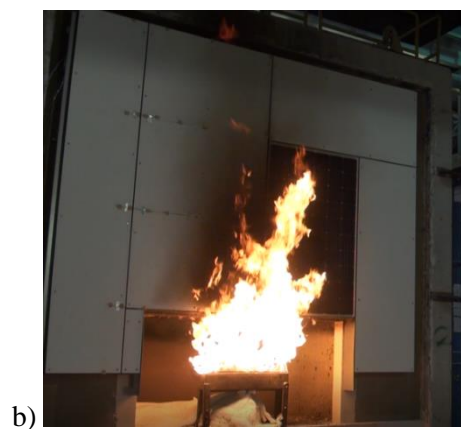
0'00''	–	rozpoczęcie badania
1'30'' – 3'00''	–	powstaje zakopcenie okładziny elewacyjnej bezpośrednio nad paleniskiem
3'40''	–	widoczne płomienie na całej wysokości przestrzeni wentylacyjnej (wystają ponad)
6'30'' – 8'00''	–	odpada wierzchnia warstwa okładziny zewnętrznej JP.2 bezpośrednio nad paleniskiem
33'00''	–	widoczne prześwity na okładzinie zewnętrznej – elementy się rozwarstwiają
120'00''	–	koniec badania.

Na rysunku 5.20 przedstawiono w formie zdjęć przebieg badania modelu rzeczywistego w kolejnych minutach.





Rys. 5.19. Model rzeczywisty elewacji wentylowanej dla serii badań J





**Rys. 5.20.** Przebieg badania modelu rzeczywistego w teście skali naturalnej serii badań J: a) 1'30"; b) 3'00"; c) 4'50"; d) 15'50"; e) 41'00"; f) 120'00"; g) po badaniu

Połączenie sposobu montażu mechanicznego oraz glifu rozwiązanego z blachy stalowej uniemożliwia bądź znacząco ogranicza dostawanie się płomieni wewnątrz przestrzeni wentylacyjnej. Takie rozwiązania umożliwiają zniszczenie elewacji poprzez wyczerpanie nośności okładziny elewacyjnej (w tym przypadku płyt włóknisto-cementowych), a nie zniszczenie łączników. W badaniu

było mało zdarzeń dotyczących płyt włóknisto-cementowych, a odpadające elementy były małych gabarytów.

### **5.1.11 Wyniki z termopar dla badanych przypadków modeli rzeczywistych elewacji**

Modele rzeczywiste dla poszczególnych serii badań przedstawionych powyżej wyposażono w termopary, które mierzyły temperaturę w funkcji czasu. Modele wyposażone w termopary wykonano dla serii: B, C, D, H, I. Termopary w zależności od serii zlokalizowano na powierzchni okładziny elewacyjnej i w przestrzeni wentylacyjnej (tzw. pustce powietrznej).

Wyniki z badania termoparami przedstawiono na wykresach, pokazując zależność temperatury od czasu oraz zależność całej przedstawiającej funkcje czasu i temperatury w odniesieniu do czasu. Wykresy wykonano dla termopar umiejscowionych na powierzchni okładzin i w przestrzeni wentylacyjnej. Przebieg wykresów obrazuje rozwój pożaru oraz postęp w zakresie destrukcji okładzin i pozostałych elementów wchodzących w skład systemu elewacji wentylowanej. Należy zauważyć, iż przebieg temperatury na palenisku dla każdego z badanych modeli jest zgodny z krzywą normową przedstawioną na rysunku 3.5. Różnice w zakresie przebiegu temperatury na wykresach wynikają z innych czynników niż paleniska. Na podstawie przebiegu badań na modelach rzeczywistych (przedstawionych w pkt. 5.1.1 – 5.1.6 i 5.1.8 – 5.1.10) i wskazań z termopar, na wykresach obrazujących wyniki z termopar oznaczono dodatkowo fazy opisujące zmiany temperaturowe oraz zmiany destrukcji materiałowej:

- faza I – faza wzrostu temperatury oraz destrukcji materiałowej;
- faza II – faza pośredniej stabilizacji temperatury i materiału;
- faza III – faza stabilizacji temperatury i materiału.

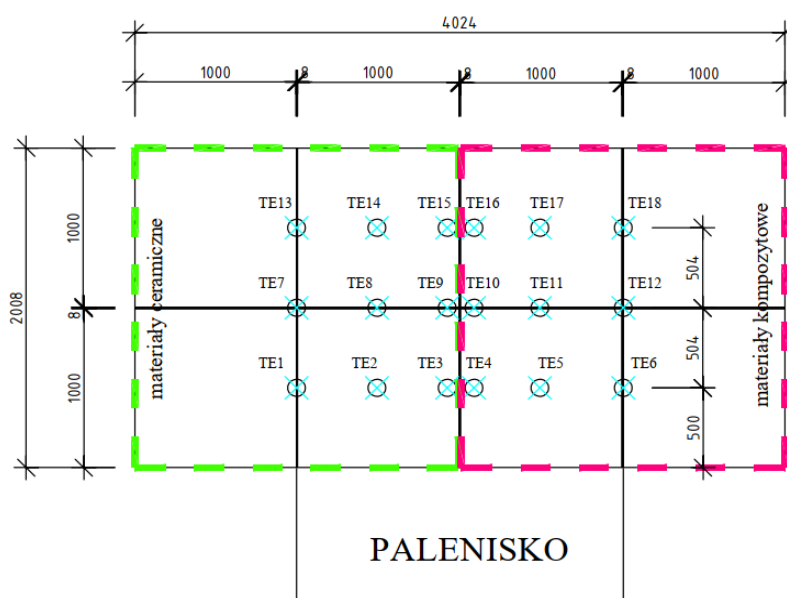
Poszczególne fazy przedstawiają różne stadia zachowania się temperatury w przestrzeni wentylacyjnej i na powierzchni okładzin, w zależności od lokalizacji montażu termopar. Na przebieg wykresów, które przedstawiają odczyty z termopar wpływ ma wiele czynników, m.in.: sposób zabezpieczenia glifu oraz przebieg jego destrukcji, czas wykraplania wełny mineralnej, przebieg destrukcji okładziny elewacyjnej i pozostałych elementów systemu elewacji wentylowanej.

Faza I charakteryzuje się bardzo dużą dynamiką wzrostu temperatury przy jednoczesnym bardzo dużym postępie destrukcji materiałowej elewacji wentylowanej. Szczególnie jest to zauważalne na początku badania, kiedy temperatura na palenisku wzrasta, co powoduje większe oddziaływanie płomieniami.

Faza II charakteryzuje się albo niestabilnością temperatury, albo postępem destrukcji materiałowej. Największe zniszczenia zaszły w fazie I, teraz następuje jej pogłębianie poprzez jeden wiodący parametr.

Faza III wykazuje się stabilizacją w zakresie przebiegu dalszych zniszczeń i rozwoju temperatury, tzn. wszystkie materiały, które ulegają szybkiej destrukcji, zostały zniszczone. W tej fazie może również występować dalsza destrukcja okładzin, lecz jest ona spowodowana wyłącznie czasem oddziaływania pożaru i w konsekwencji powolną destrukcją materiału.

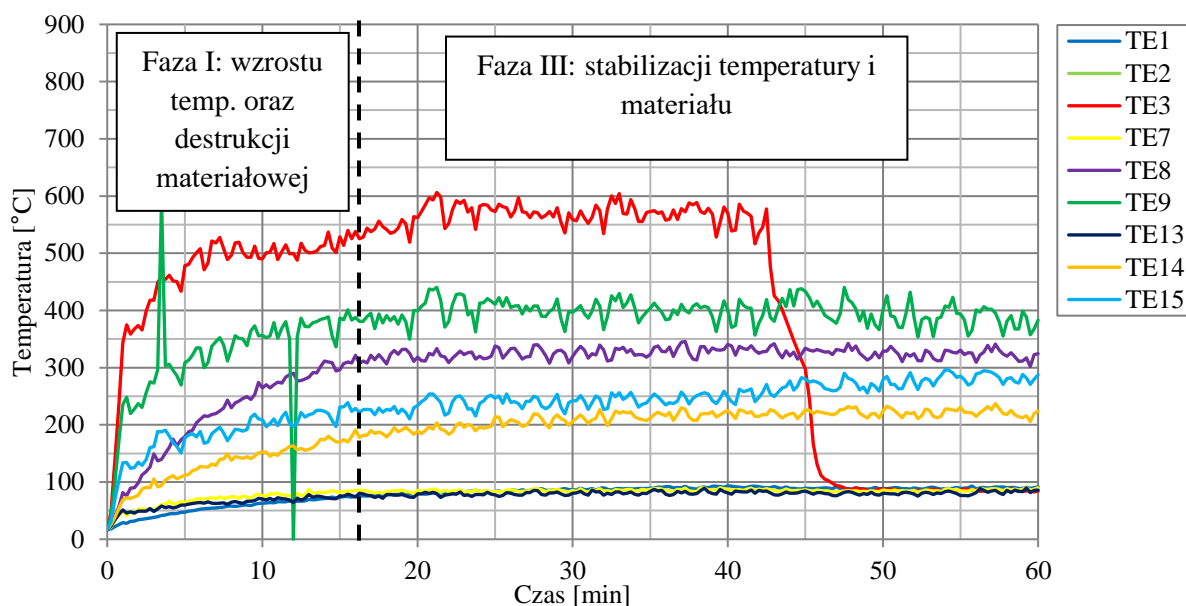
Lokalizację termopar na powierzchni okładzin zewnętrznych dla wcześniej wyszczególnionych modeli przedstawiono kolejno na rysunkach: 5.21, 5.25, 5.28, 5.30, 5.32.



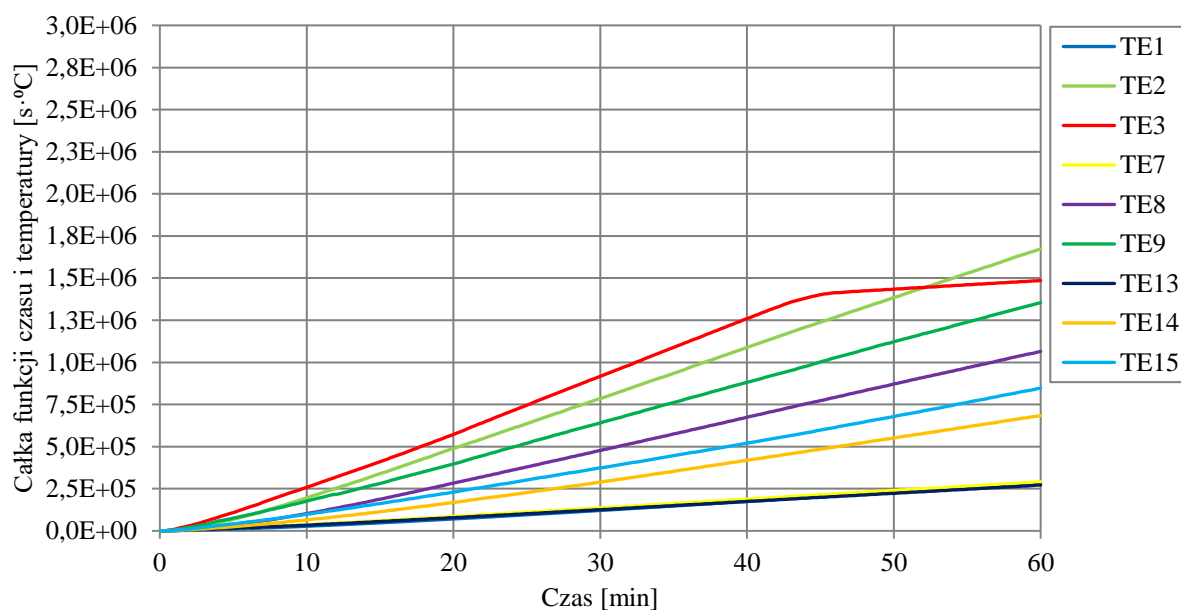
**Rys. 5.21.** Lokalizacja termopar na powierzchni okładziny zewnętrznej dla modelu rzeczywistego elewacji serii badań B

Wyniki przebiegu temperatury na powierzchni okładziny elewacyjnej dla serii płyt B w podziale na materiały ceramiczne i materiały kompozytowe przedstawiono na wykresach 5.1 i 5.3. Dodatkowo na wykresach 5.2 i 5.4 przedstawiono całki funkcji temperatury i czasu w zależności od czasu trwania badania. Dla materiałów ceramicznych (wykres 5.1) największy wzrost temperatury notowany jest do około 17 minut. W tym czasie nastąpił początkowy najbardziej gwałtowny rozwój pożaru i najbardziej agresywna destrukcja materiału powodująca odpadanie poszczególnych elementów i wypalanie materiałów, co wskazuje na fazę I. Kolejno, z pominięciem fazy II – pośredniej, następuje faza III – stabilizacji temperatury i materiału, która oznacza, iż największe zniszczenia również w zakresie odpadania części elementów elewacji wentylowanej dokonały się w fazie poprzedniej, czyli fazy I. Zniszczenie poszczególnych elementów elewacji wentylowanej odbywa się w większości poprzez destrukcję wewnętrzną - strukturalną, co nie oznacza iż w przypadku długotrwałego oddziaływania takimi temperaturami nie spowoduje to odpadania tych elementów. W analizowanej fazie, czyli w fazie stabilizacji temperatury i materiału (fazie III), widoczna jest stała temperatura, aż do końca badania z wyłączeniem termopary TE3, która to odpadła z modelu rzeczywistego elewacji razem z elementem

okładziny elewacyjnej BP.4 w 43 minucie. Przebieg wykresu 5.2 jest liniowy, co wskazuje na dużą stabilność temperatury.



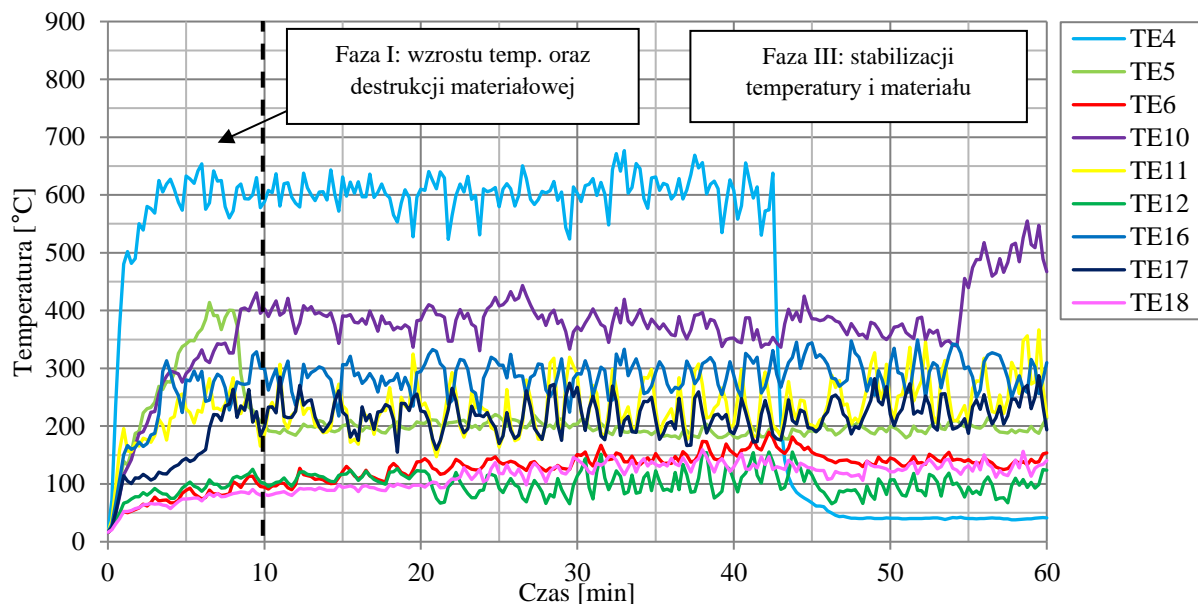
**Wykres 5.1.** Wyniki temperatur dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań B – materiały ceramiczne



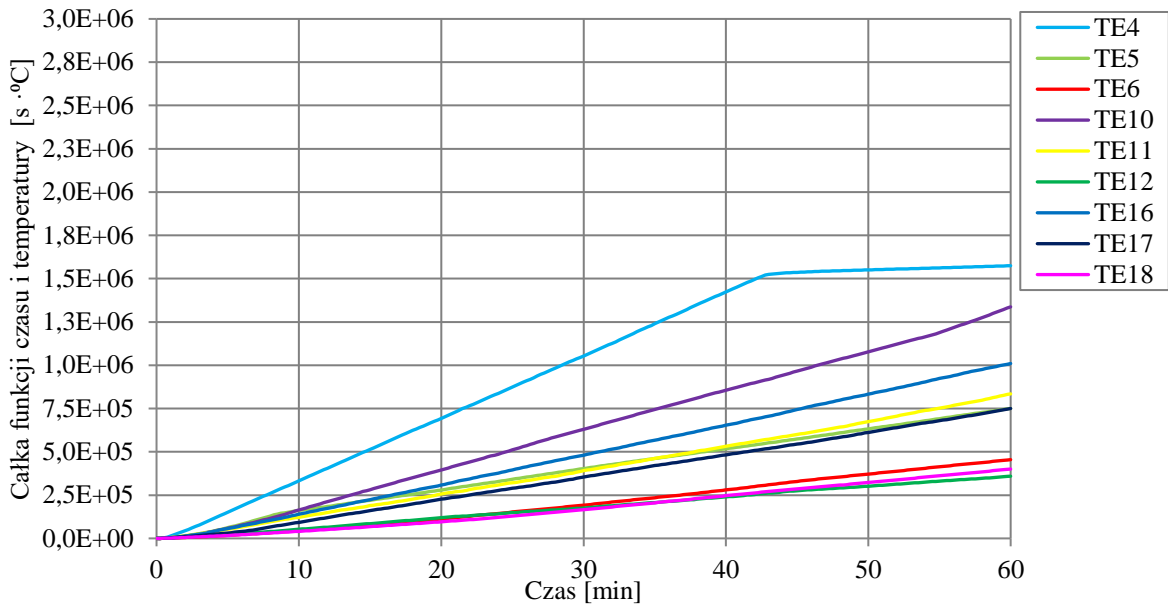
**Wykres 5.2.** Całki funkcji czasu i temperatury dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań B – materiały ceramiczne

Wykres 5.3 przedstawia dane odczytane z termopar dla materiałów kompozytowych - warstwowych, które również były materiałami niepalnymi - klasa A2 wg euroklasy [19]. Przebieg tych wyników zbliżony jest do liniowego wykazując już w początkowych fazach stabilność materiału, co

odpowiada fazie stabilizacji temperaturowej i materiałowej. Stabilizacja ta przebiega z większymi odchyleniami niż w przypadku wykresu 5.1. Faza I wzrostu temperatury i destrukcji materiałowej trwa do około 10'00" minuty, co sprawia, iż materiały szybko ulegają destrukcji, w występują odpadania elementów płyty okładzinowej BP4 już w około 8'00" minucie. Następnie materiał przechodzi bezpośrednio do fazy III z pominięciem fazy pośredniej stabilizacji materiałowej i temperaturowej, co w przypadku tego materiału oznacza stały przebieg przy zwiększającej się destrukcji. Termopara TE4 w pewnym momencie odpada wraz z elementami okładziny zewnętrznej. Zauważalne w przypadku tych dwóch materiałów są również różnice temperatur odczytywane z termopar, stabilniejsze w materiałach ceramicznych oraz wyższe w materiałach kompozytowych. Temperatura maksymalna wskazana jest na termoparach TE3 i TE4, osiągając wartości do 600°C dla spieków ceramicznych oraz nawet do 670°C dla materiałów kompozytowych. Różnice te spowodowane są większą destrukcją materiałów kompozytowych.



**Wykres 5.3.** Wyniki temperatur dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań B – materiały kompozytowe



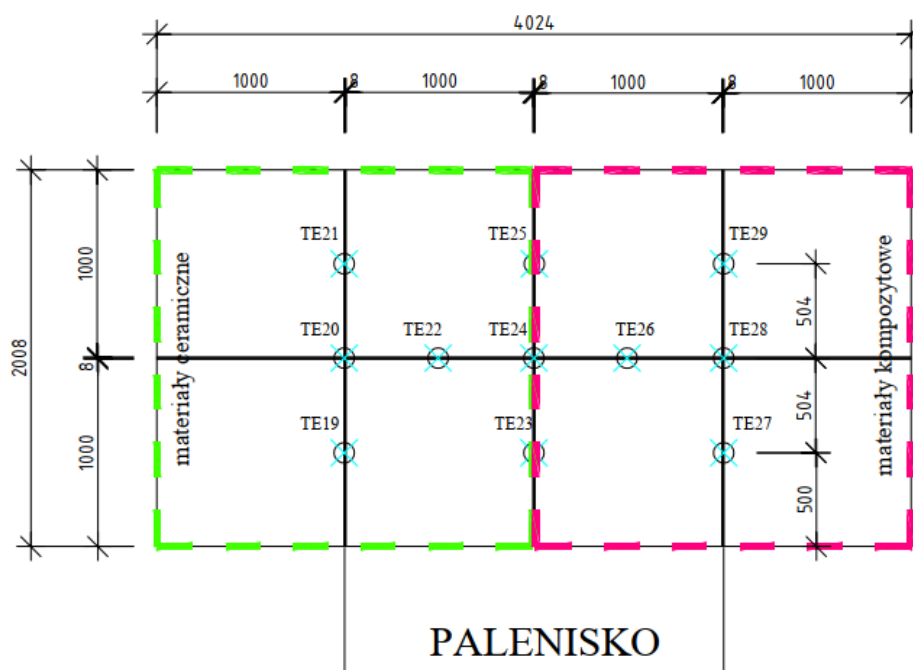
**Wykres 5.4.** Całki funkcji czasu i temperatury dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań B – materiały kompozytowe

Na rysunku 5.22 przedstawiono fotografię z badania serii B w 6'00" minucie, co odwzorowuje największe wahania przebiegu temperatury na wykresach 5.1 – 5.4 i przynależy ona do fazy I, czyli fazy wzrostu temperatury i destrukcji materiałowej, zarówno na powierzchni, jak i dla przestrzeni wentylacyjnej.



**Rys. 5.22.** Przebieg badania modelu rzeczywistego w serii badań B w 6'00" minucie

Model rzeczywisty elewacji serii B został również wyposażony w termopary wewnątrz przestrzeni wentylacyjnej. Lokalizację termopar przedstawia rysunek 5.23.

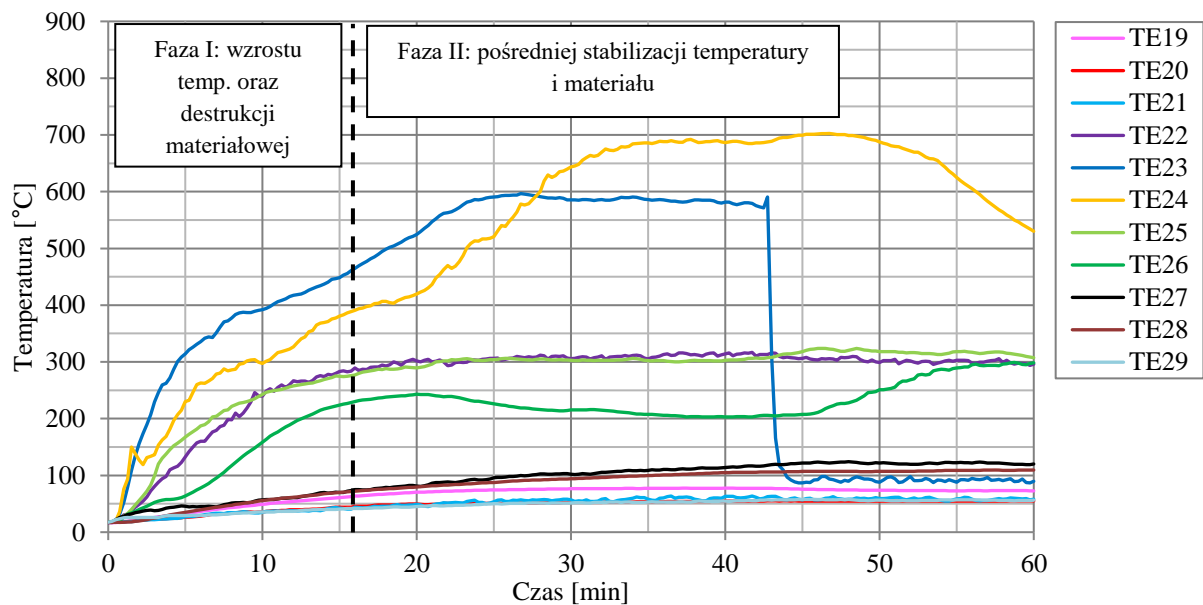


**Rys. 5.23.** Lokalizacja termopar w przestrzeni wentylacyjnej dla modelu rzeczywistego elewacji serii badań B

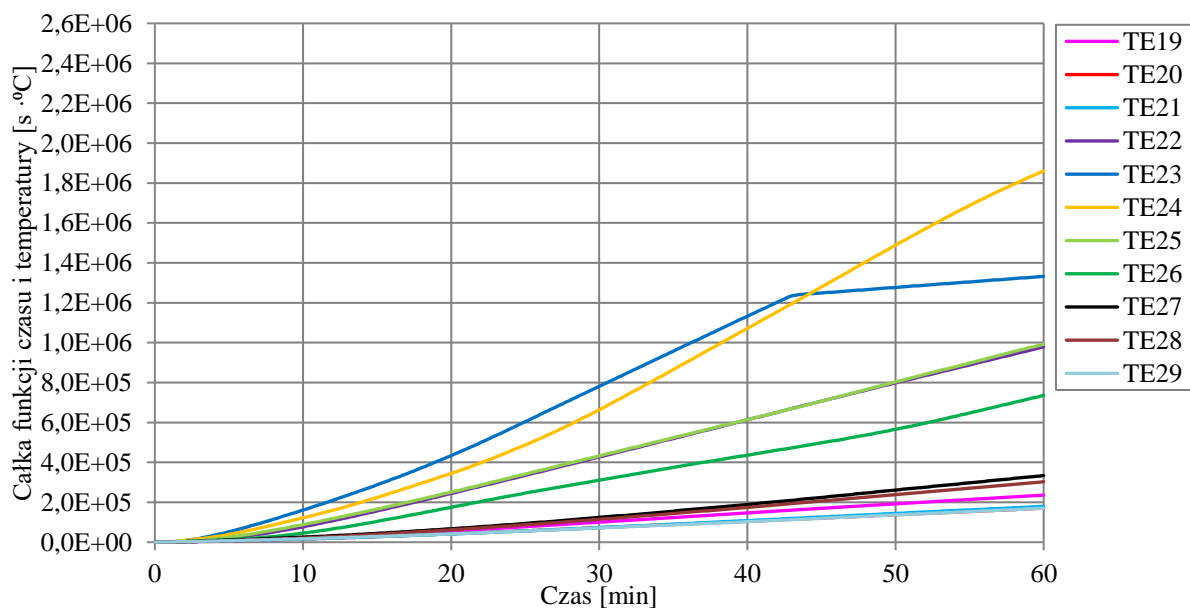
Wyniki przebiegu temperatury w przestrzeni wentylacyjnej dla serii badań B przedstawiono na wykresie 5.5. Dodatkowo dla analizowanej serii na wykresie 5.6 przedstawiono również przebieg całki funkcji temperatury i czasu w zależności od czasu. Na podstawie wykresów zauważono, iż temperatury w przestrzeni wentylacyjnej są dużo wyższe w porównaniu do temperatur na powierzchni w identycznej strefie, tzn. w bezpośredniej bliskości do paleniska. Wyższe temperatury w pustce powietrznej powodują większą destrukcję poszczególnych elementów kompletnego systemu elewacji wentylowanej. W przypadku przestrzeni wentylacyjnej faza I trwa do około 25'00" minuty. Wzrost temperatury w przestrzeni wentylacyjnej wynika ze zniszczenia glifu oraz stopniowego wytapiania wełny mineralnej. Początkowo gorące gazy przepływają przez pustkę powietrzną bardzo szybko (zawdzięczają to znacznemu wpływowi efektu kominowego), przez co ich zasięg oddziaływania jest bardzo duży (płomienie są widoczne nad badaną platformą) przy jednoczesnym niskim odczycie wartości temperatur na termoparach. Wraz z postępem pożaru, wełna ulega całkowitemu wytopieniu co powoduje redukcję efektu ciągu kominowego i utrzymywanie się płomieni blisko paleniska oraz znaczny wzrost wysokości odczytanych temperatur na termoparach. W analizowanej serii dla przestrzeni wentylacyjnej wyróżnia się jedynie dwie fazy – fazę I (fazę wzrostu temperaturowego oraz destrukcji materiałowej) do około 16'00" minuty, która charakteryzuje się dużą dynamiką odczytów na termoparach i znacznym postępem destrukcji elementów w przestrzeni wentylacyjnej, głównie wełny mineralnej. Kolejno następuje faza II: pośredniej stabilizacji temperaturowej i materiałowej, która rozpoczyna się od stabilizacji przebiegu wykresów oraz postępującego wykraplania wełny mineralnej oraz dalszego niszczenia przestrzeni wentylacyjnej. Wykraplanie wełny oraz przyspieszająca destrukcja



puszki powietrznej powoduje kolejne wzrosty temperatury w miejscach bezpośredniej bliskości paleniska. Termopara TE23 w trakcie badania odpada razem z elementami okładziny elewacyjnej.



**Wykres 5.5.** Wyniki temperatur dla termopar umieszczonych w przestrzeni wentylacyjnej dla serii badań B



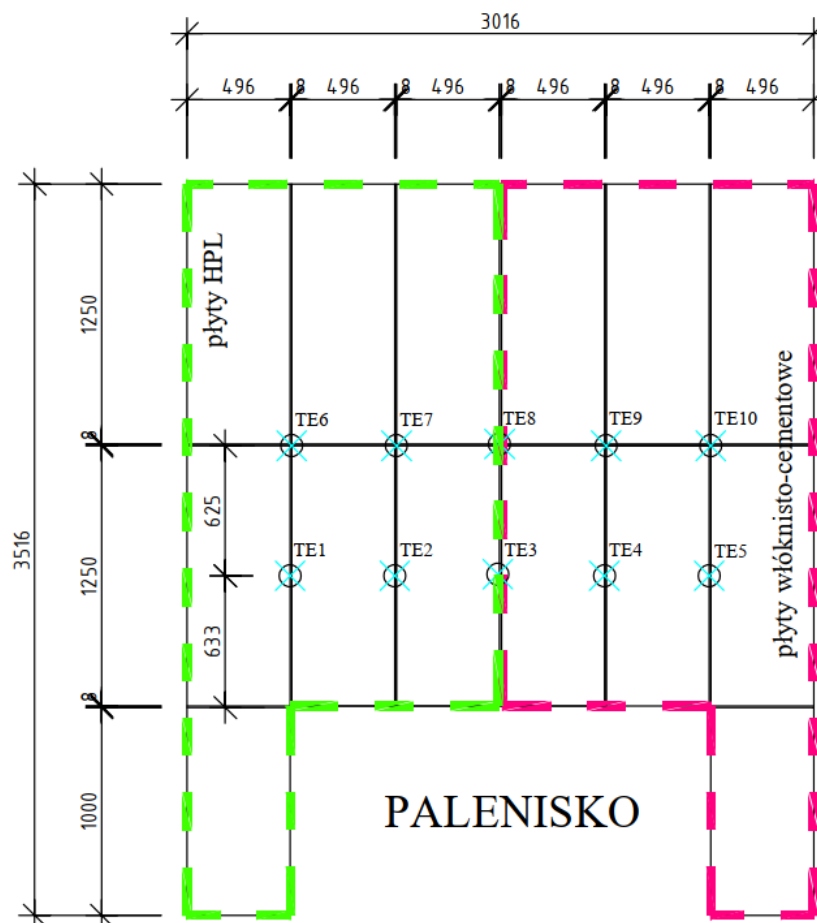
**Wykres 5.6.** Całki funkcji czasu i temperatury dla termopar umieszczonych w przestrzeni wentylacyjnej dla serii badań B

Gwałtowny wzrost temperatury w przestrzeni wentylacyjnej na wykresach w fazie I spowodowany jest ograniczeniem występowania efektu ciągu kominowego wynikającego z wytapiania wełny mineralnej. Przykład efektu ciągu kominowego dla serii badań B przedstawiono na rysunku 5.24.



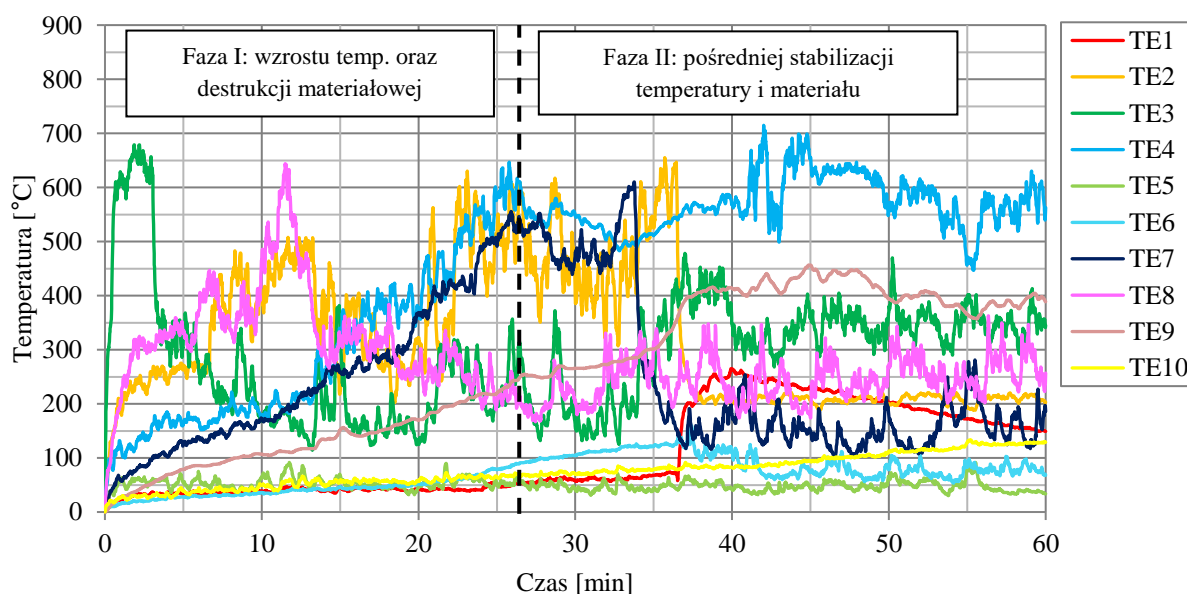
**Rys. 5.24.** Płomienie wewnątrz przestrzeni wentylacyjnej w 5'00" minucie badania dla serii B

Model rzeczywisty elewacji serii C został opomiarowany na powierzchni okładziny elewacyjnej (rysunek 5.25) oraz w przestrzeni wentylacyjnej (rysunek 5.27).

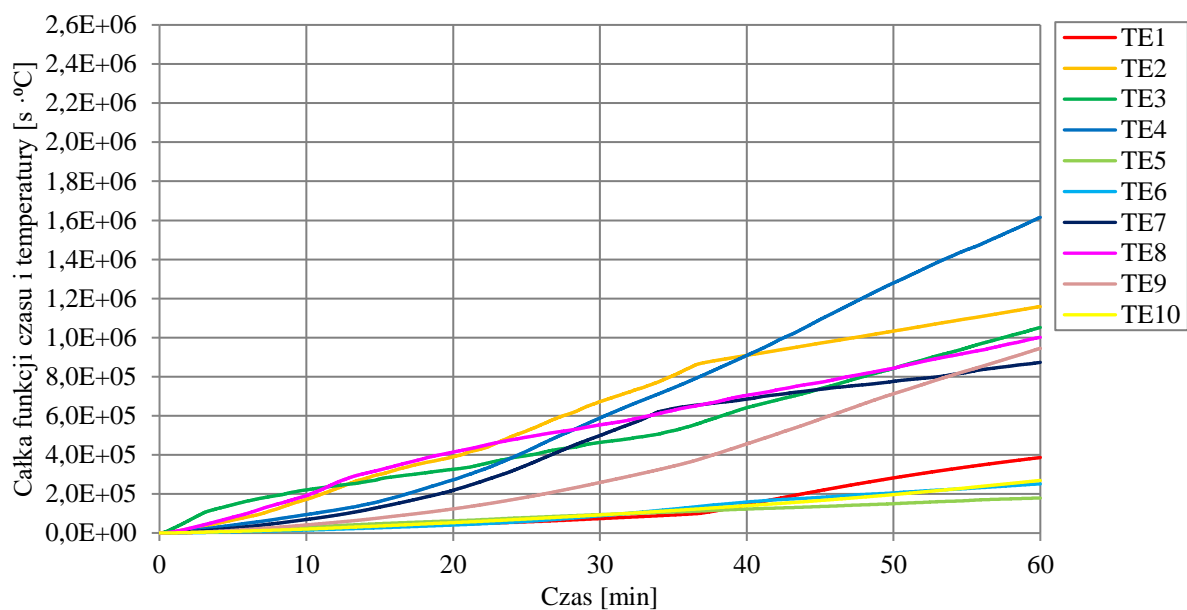


**Rys. 5.25.** Lokalizacja termopar na powierzchni okładziny zewnętrznej dla modelu rzeczywistego elewacji serii badań C

Wyniki przebiegu temperatur na powierzchni okładziny dla serii badań C przedstawiono na wykresie 5.7. Dodatkowo przedstawiono również całki funkcji temperatury i czasu w odniesieniu do czasu na wykresie 5.8. W przeciwieństwie do wyników uzyskanych w serii B, wyniki temperatury uzyskane z termopar dla serii C przedstawione na wykresach wskazują małą stabilność i duże odchylenia. Oznacza to, iż ogień bardzo szybko powoduje destrukcję część okładziny zewnętrznej, która jest wykonana z materiałów palnych: HPL (klasa reakcji na ogień B [19]). Ponadto klasa reakcji na ogień płyt HPL powoduje utrzymywanie się ognia na powierzchni okładzin na znacznej wysokości, a nawet efekt „pnięcia” się płomieni na samą górę platformy. Po zniszczeniu części okładziny elewacyjnej wykonanej z materiałów palnych płomienie mają ułatwiony dostęp do pozostałej części okładziny elewacyjnej, powodując większe zniszczenia w płytach włóknisto-cementowych. Od około 37'00” minuty destrukcji ulegają również płyty włóknisto-cementowe w dolnej partii, przez co odnotowany jest wzrost temperatury na termoparach TE9 i TE10. Podobnie jak w przypadku innych serii efekt ciągu kominowego charakteryzują niższe temperatury, a w konsekwencji mniejszą destrukcją, aniżeli otwarty dostęp płomieni do elementu. W przypadku serii badań C faza I jest bardzo zmienna. Stabilizacja fazy I zaszła dopiero po wypaleniu się materiałów palnych w obrębie zasięgu pióropusza ognia (rysunek 5.26).



**Wykres 5.7.** Wyniki temperatur dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań C



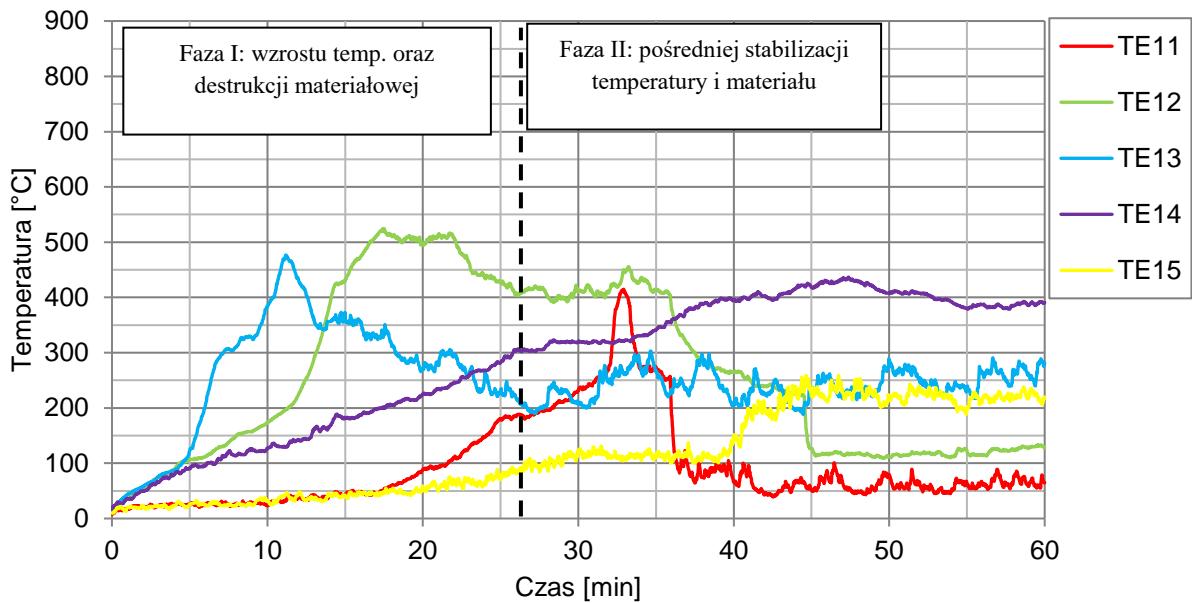
**Wykres 5.8.** Całki funkcji czasu i temperatury dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań C



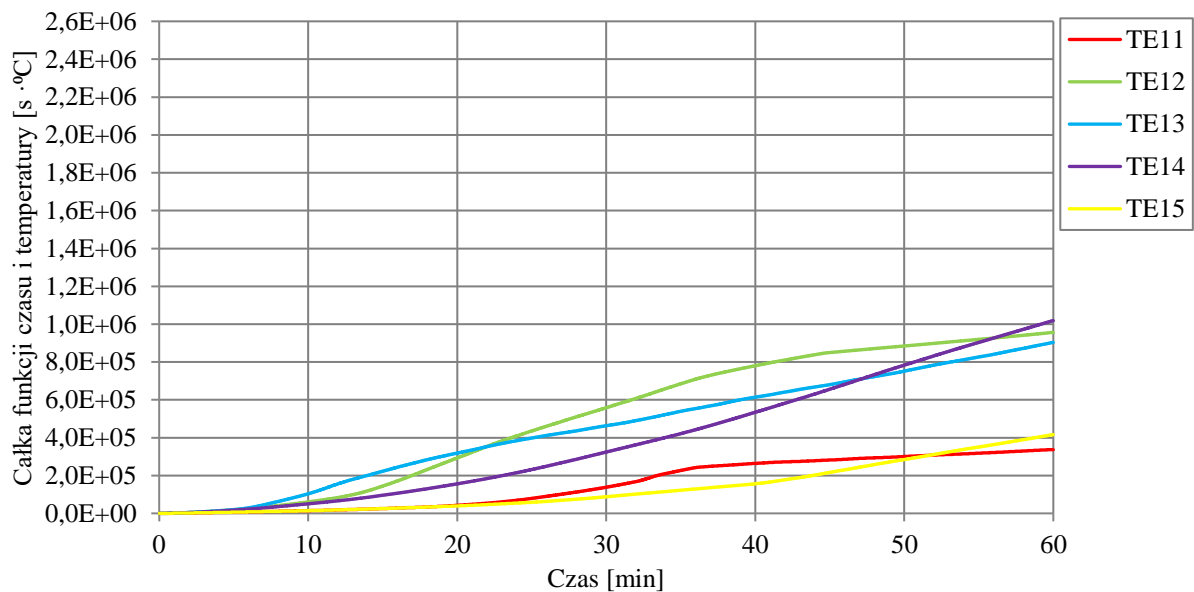
**Rys. 5.26.** Powolna stabilizacja fazy I po wypaleniu się materiałów palnych w 25'00'' minucie badania dla serii C

Na rysunku 5.27 przedstawiono lokalizację termopar w przestrzeni wentylacyjnej dla modelu serii badań C. Termopary były rozłożone na wysokości połączenia okładzin elewacyjnych – 1250 mm nad gładem.



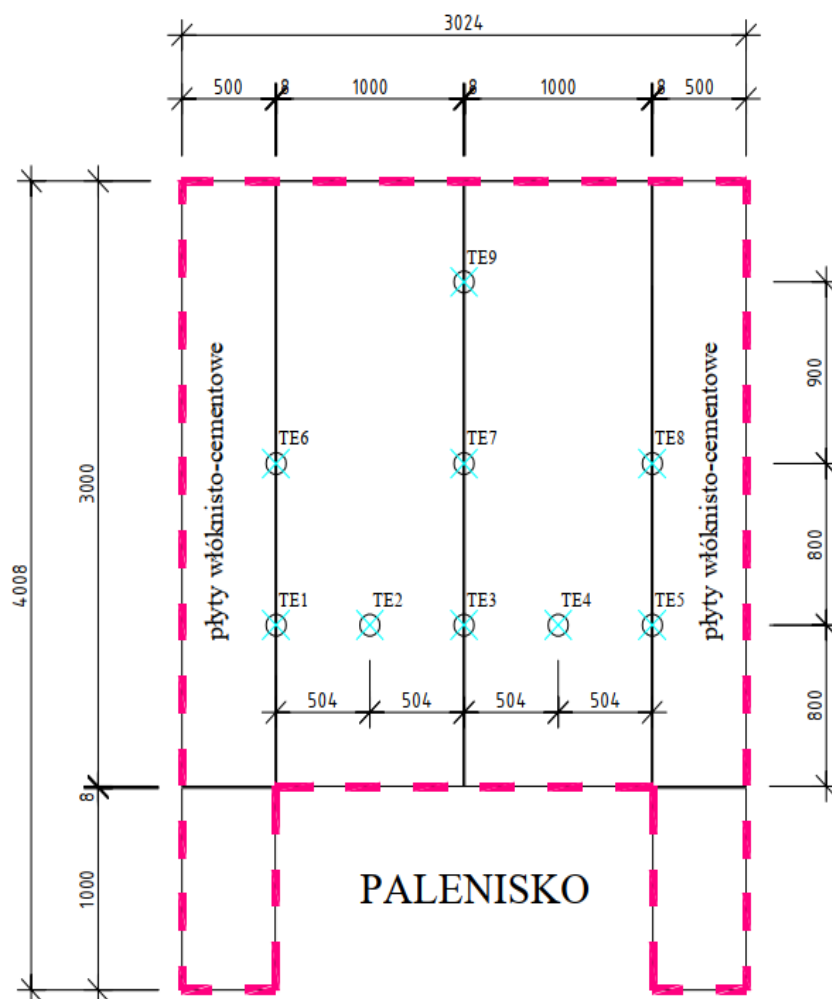


**Wykres 5.9.** Wyniki temperatur dla termopar umieszczonych w przestrzeni wentylacyjnej dla serii badań C



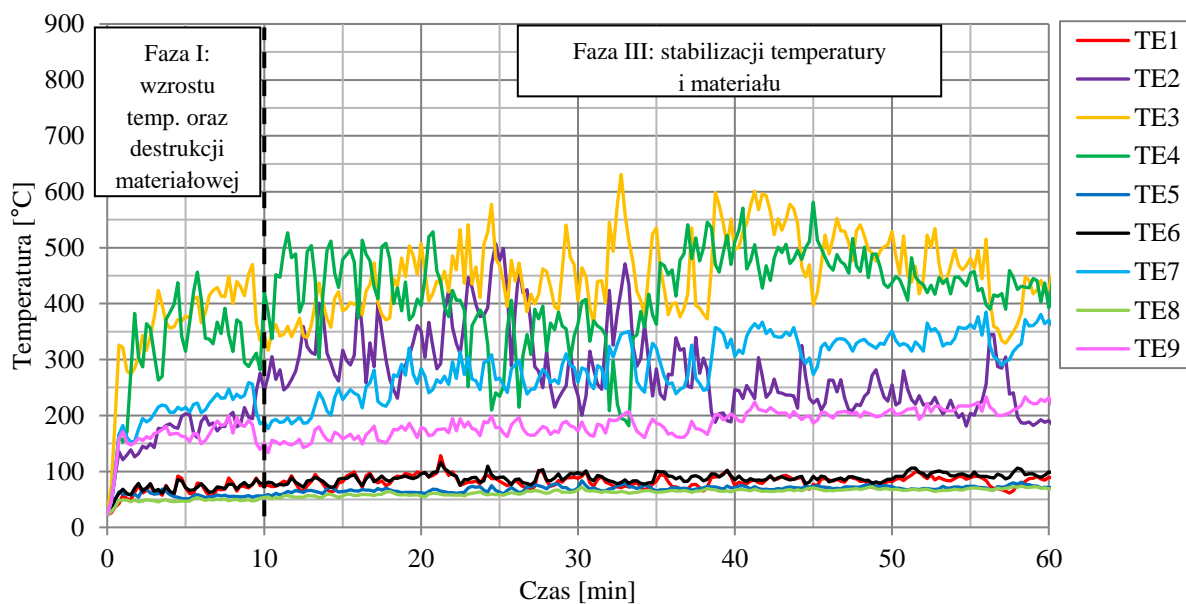
**Wykres 5.10.** Całki funkcji czasu i temperatury dla termopar umieszczonych w przestrzeni wentylacyjnej dla serii badań C

W serii badań D termopary umieszczono na powierzchni okładziny elewacyjnej (rysunek 5.28) i w przestrzeni wentylacyjnej (rysunek 5.29). Termopary były umieszczone na trzech wysokościach – pierwszy rząd na wysokości 800 mm, drugi rząd na wysokości 1600 mm, trzeci rząd na wysokości 2400 mm nad glifem oraz w pięciu kolumnach.

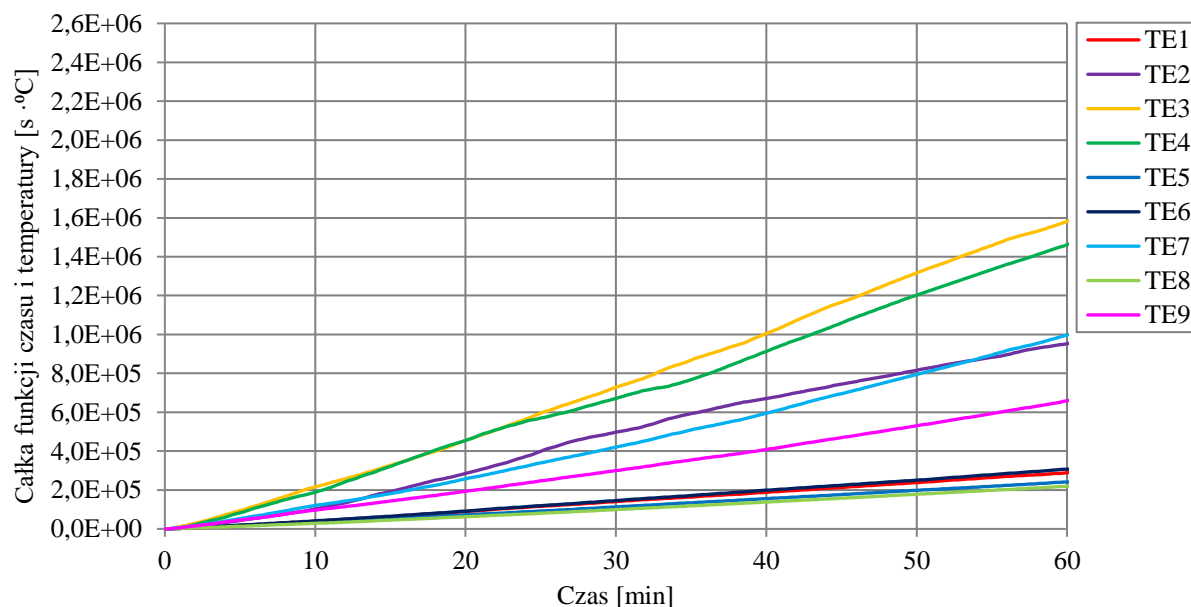


**Rys. 5.28.** Lokalizacja termopar na powierzchni okładziny zewnętrznej dla modelu rzeczywistego elewacji w serii badań D

Wyniki przebiegu temperatury na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań D przedstawiono na wykresie 5.11, wyniki całki funkcji temperatury i czasu w zależności od czasu na wykresie 5.12. Okładzinę elewacyjną wykonano na całej powierzchni z płyt włóknisto-cementowych. Po badaniu oddziaływaniem pożarem powierzchnia okładziny elewacyjnej wykazywała znaczną destrukcję. Seria ta charakteryzowała się jedynie dwoma fazami przebiegu temperatury i destrukcji materiałowej, tak samo jak seria B przedstawiona na wykresie 5.3. Obie te serie charakteryzowały się wykorzystaniem jako okładziny zewnętrznej materiałów o klasie reakcji na ogień „niepalne” oraz czasem trwania I fazy około 10’00” minut. Spowodowało to, iż materiał dość szybko uległ destrukcji, a następnie wykazywał dużą stabilność i przewidywalność zachowania. Odpadające elementy z elewacji wentylowanej występują w fazie III, tzn.: 13’30”, 17’15” i 34’00” minucie. Wyniki odczytów temperatury na wykresie 5.12 charakteryzują się dużą stabilnością i liniowym przyrostem.



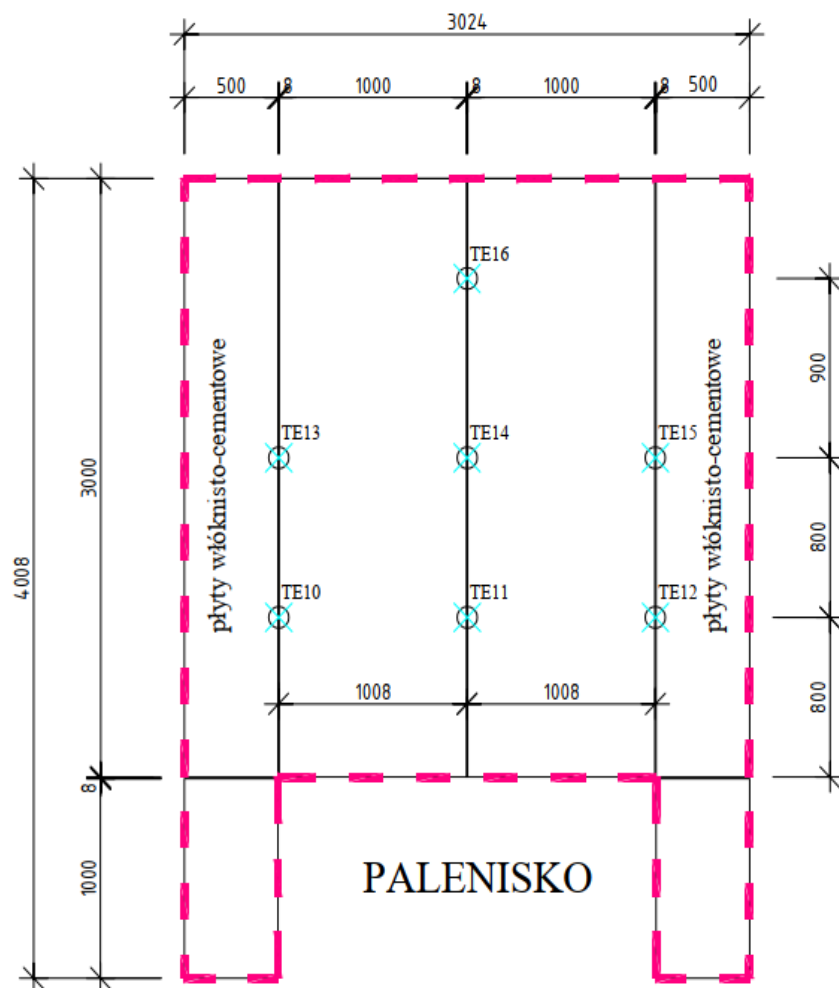
**Wykres 5.11.** Wyniki temperatur dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań D



**Wykres 5.12.** Całki funkcji czasu i temperatury dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań D

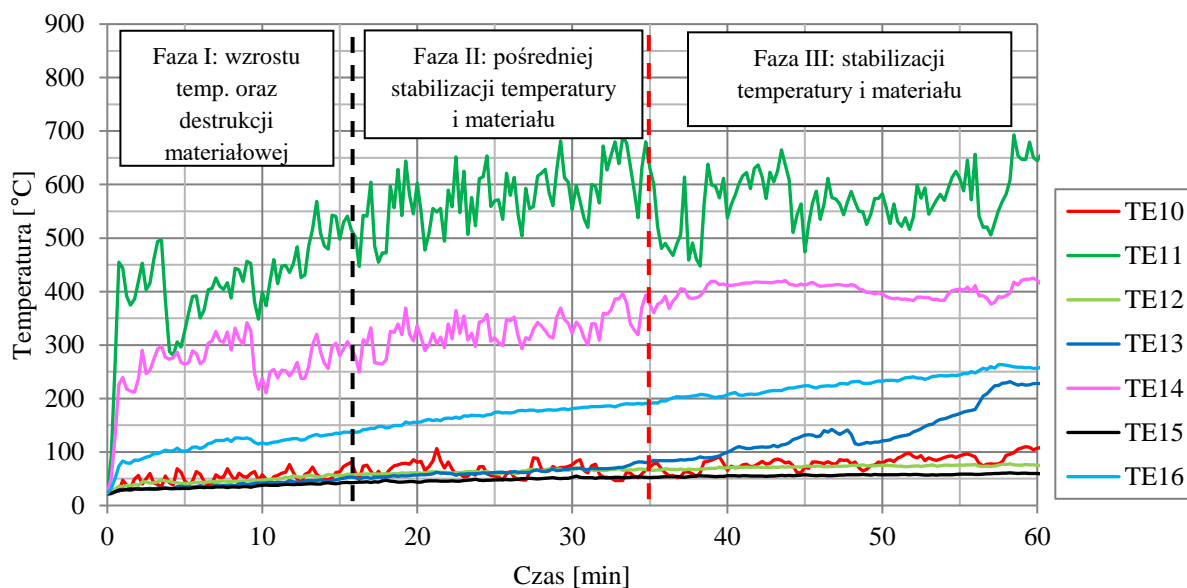
Na rysunku 5.29 przedstawiono lokalizację termopar znajdujących się w przestrzeni wentylacyjnej dla serii D. Termopary w przestrzeni wentylacyjnej umiejscowiono na trzech wysokościach, jednak w przeciwieństwie do termopar umiejscowionych na powierzchni okładzin, zlokalizowano je w trzech kolumnach.



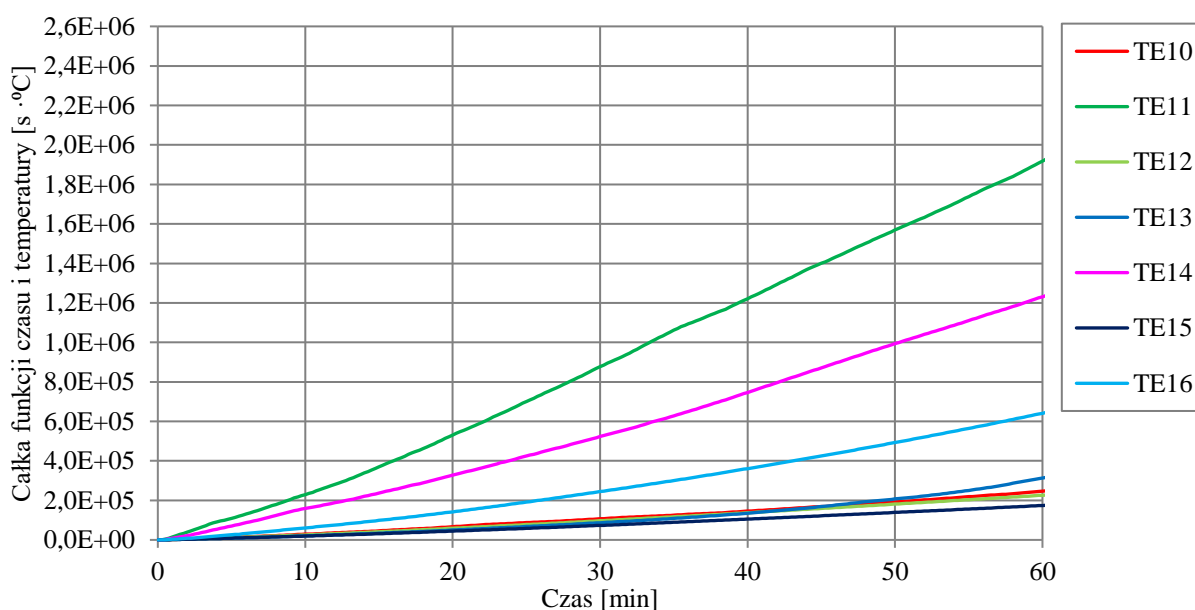


**Rys. 5.29.** Lokalizacja termopar w przestrzeni wentylacyjnej dla modelu rzeczywistego elewacji dla serii badań D

Wyniki przebiegu temperatury w przestrzeni wentylacyjnej dla serii badań D przedstawiono na wykresie 5.13, natomiast całość funkcji temperatury i czasu w zależności od czasu na wykresie 5.14. Analogicznie do poprzednich serii badań temperatura w przestrzeni wentylacyjnej podczas postępu destrukcji (wraz z kolejnymi minutami badania) zwiększa się, spowodowane jest to redukcją efektu ciągu kominowego. W analizowanej serii dla przestrzeni wentylacyjnej wyróżnia się trzy fazy przebiegu temperatury i destrukcji materiałowej. Pierwsza to faza wzrostu temperaturowego oraz destrukcji materiałowej trwająca do około 16'00" minuty, charakteryzująca się dużą dynamiką odczytów na termoparach oraz znacznym postępowaniem destrukcji przestrzeni wentylacyjnej (w największym stopniu wytapianiem wełny mineralnej). Kolejno następuje faza II. Faza III występuje od około 35'00" minuty, lecz trudno wskazać dokładny moment przejścia, dlatego w przeciwieństwie do wcześniejszych wykresów oznaczono go linią czerwoną.

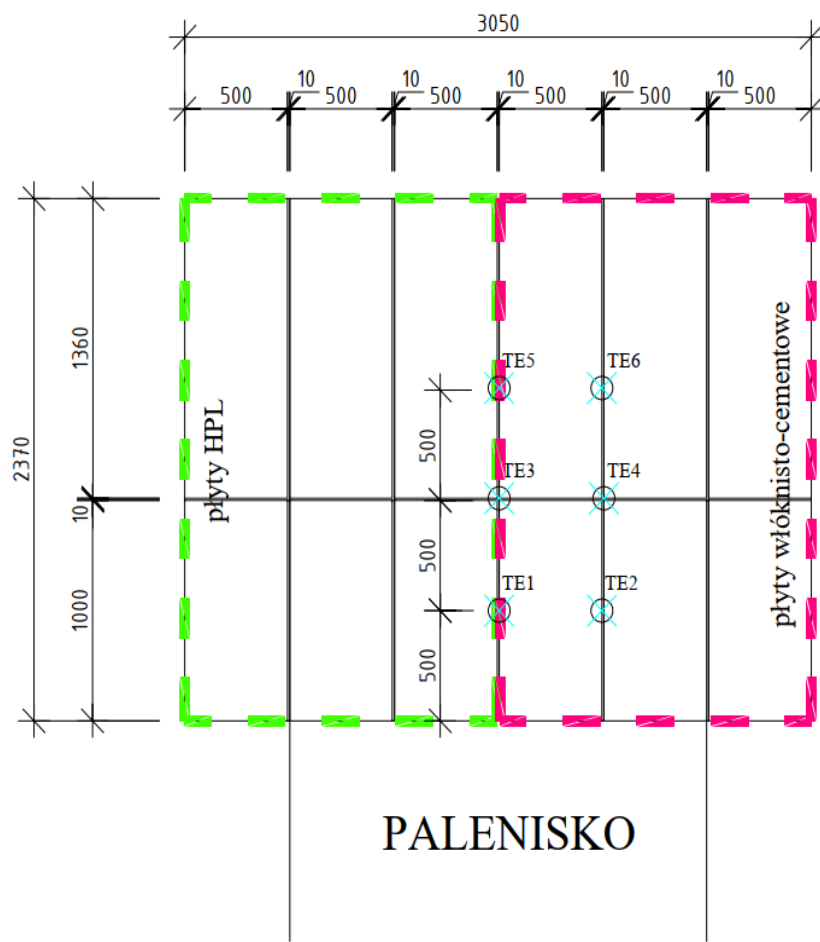


**Wykres 5.13.** Wyniki temperatur dla termopar umieszczonych w przestrzeni wentylacyjnej dla serii badań D



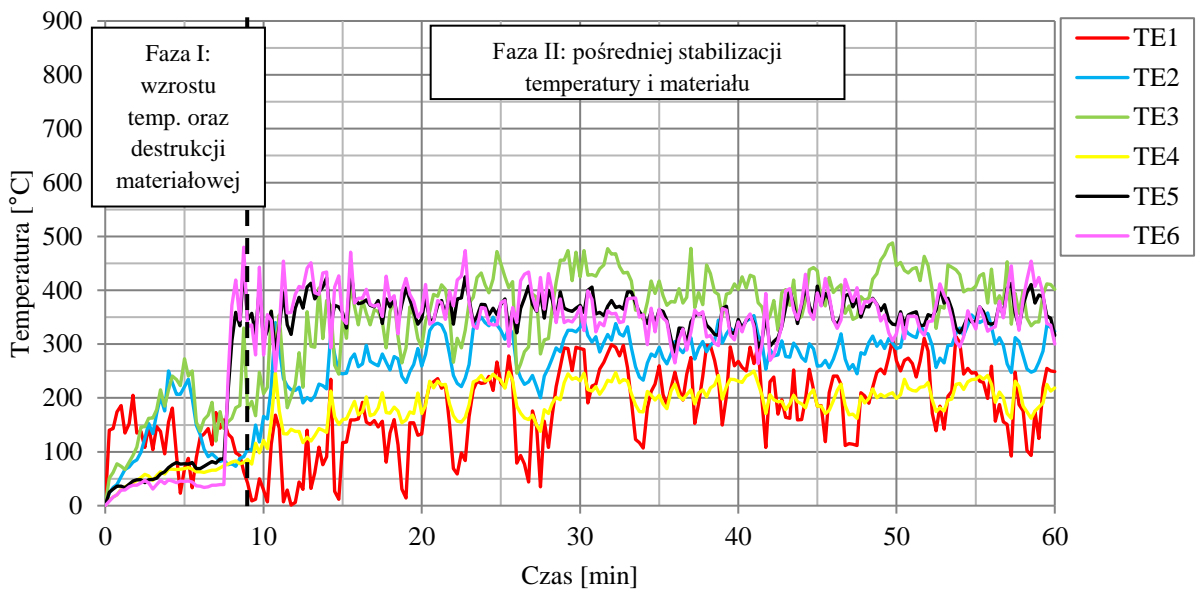
**Wykres 5.14.** Całki funkcji czasu i temperatury dla termopar umieszczonych w przestrzeni wentylacyjnej dla serii badań D

Kolejną serią, w której wykonano pomiary na termoparach, była seria badań H. Lokalizację termopar na powierzchni okładzin przedstawiono na rysunku 5.30. Termoparami opomiarowano tylko strefę z płytami włóknisto-cementowymi.

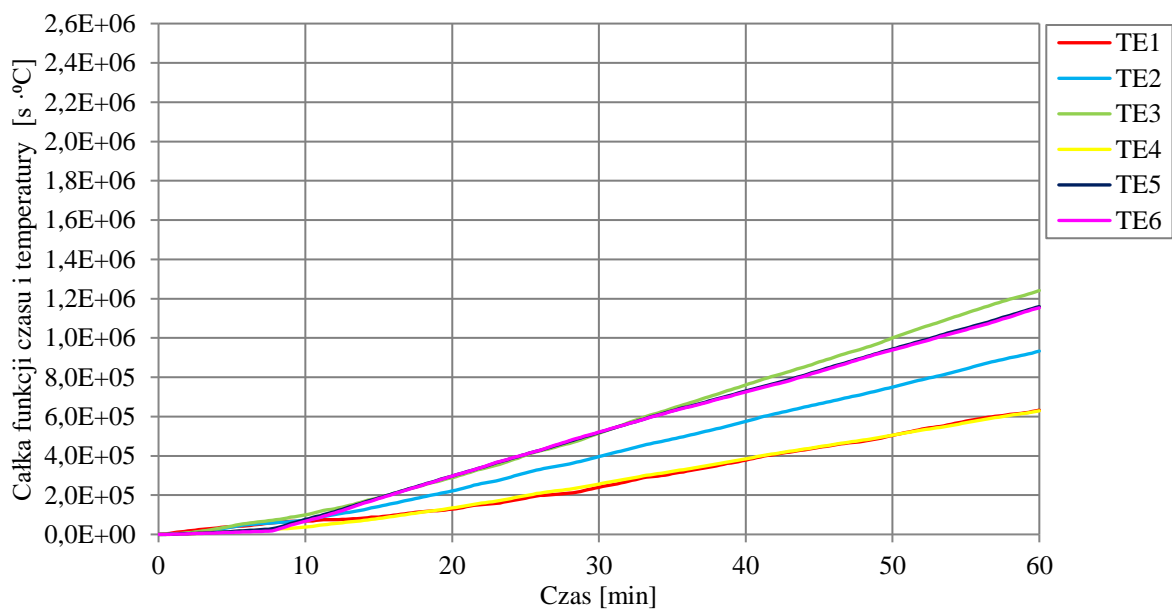


**Rys. 5.30.** Lokalizacja termopar na powierzchni okładziny zewnętrznej dla modelu rzeczywistego elewacji dla serii badań H

Wyniki przebiegu temperatury na powierzchni okładziny dla serii badań H przedstawiono na wykresie 5.15. Całą funkcję temperatury i czasu w zależności od czasu przedstawiono na wykresie 5.16. Początkowo wskazania na termoparach pokazywały dość niską temperaturę jak na warunki pożaru w badaniu modelu rzeczywistego. Niskie odczyty temperatury spowodowane były dobrym sposobem rozwiązania glifu – wykonanym ze stali, zamiast z elementów okładziny elewacyjnej. Odczyty temperatury na termoparach wzrastają dopiero po zniszczeniu glifu, wskazuje to widoczny skokowy wzrost temperatury na wykresach 5.16 i 5.17. Pomimo dobrego zabezpieczenia glifu faza II następuje dość szybko, ponieważ rozpoczyna się już w około 9'00" minucie. Odpadające elementy z elewacji (całe płyty), występują do około 10'30" minuty, co wskazuje na zawodne rozwiązanie połączenia okładziny elewacyjnej z podkonstrukcją.

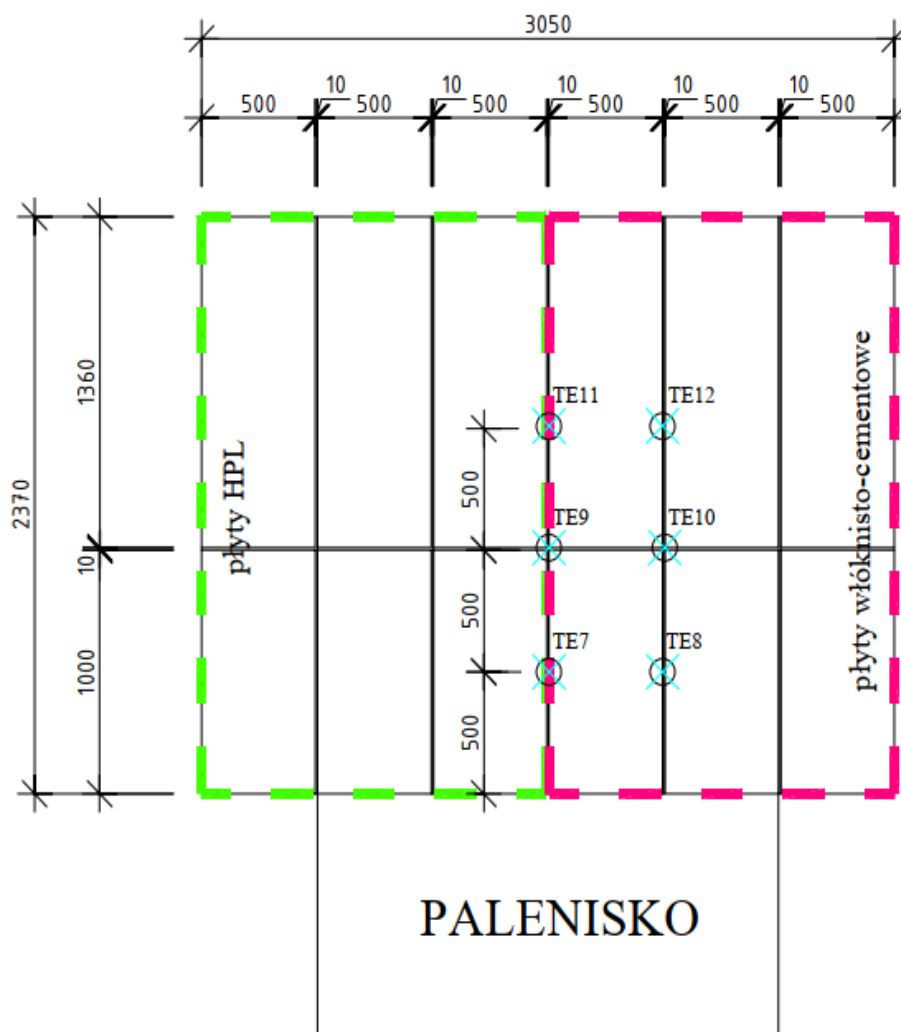


**Wykres 5.15.** Wyniki temperatur dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań H



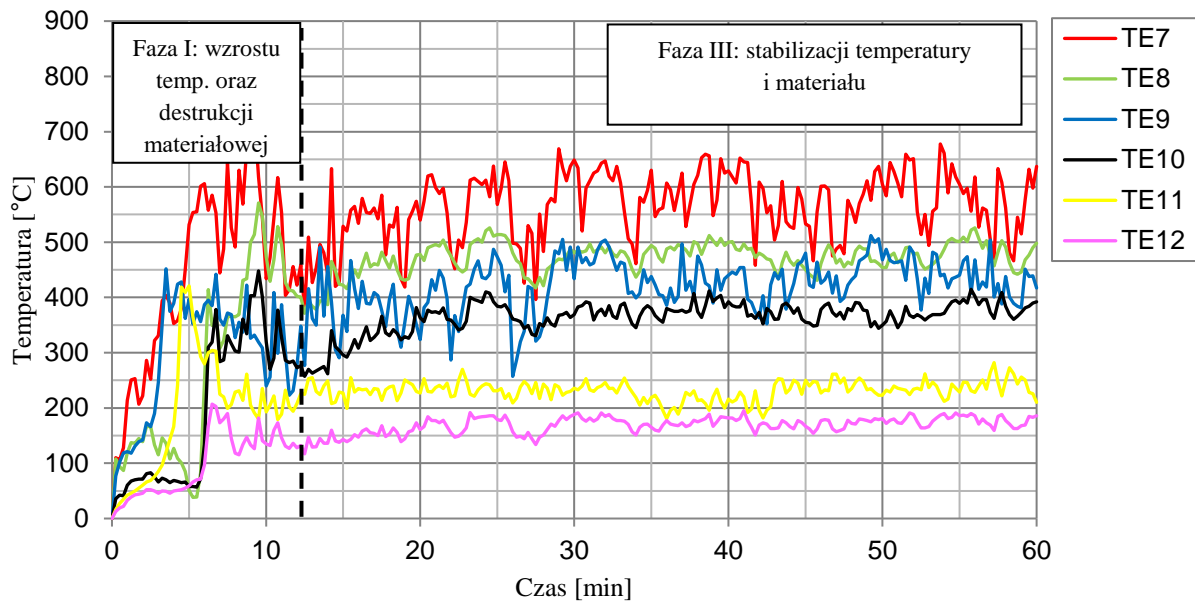
**Wykres 5.16.** Całki funkcji czasu i temperatury dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań H

Na rysunku 5.31 przedstawiono lokalizację termopar w przestrzeni wentylacyjnej dla modelu rzeczywistego serii H. Opomiarowana była wyłącznie strefa, gdzie jako okładzinę elewacyjną zastosowano płyty włóknisto-cementowe.

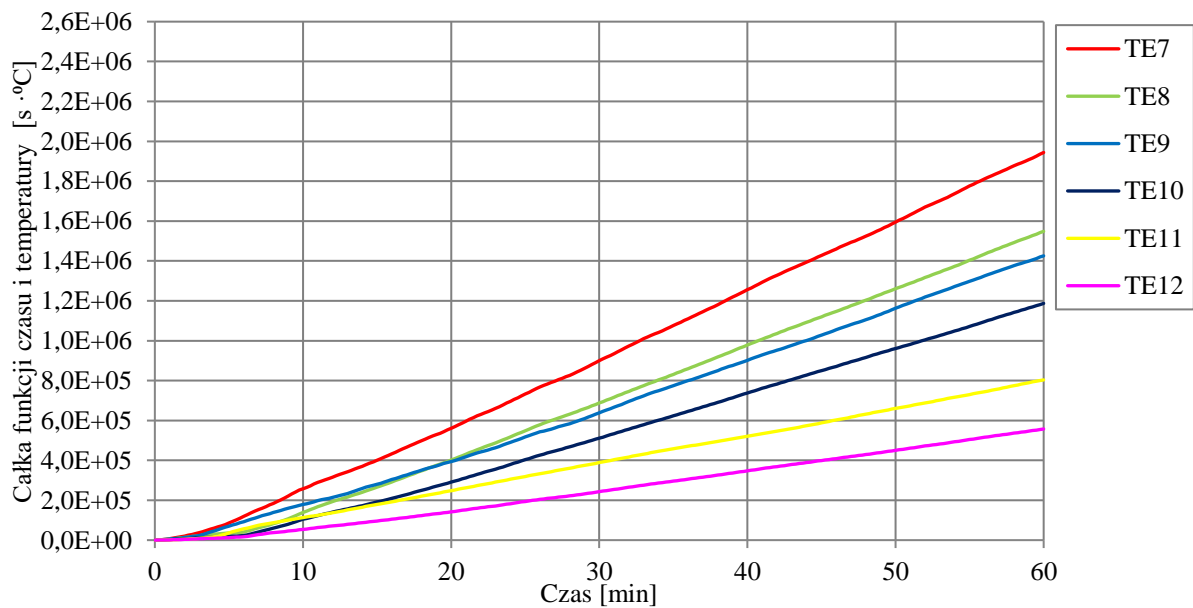


**Rys. 5.31.** Lokalizacja termopar w przestrzeni wentylacyjnej dla modelu rzeczywistego elewacji serii badań H

Wyniki przebiegu temperatury w przestrzeni wentylacyjnej dla serii badań H przedstawiono na wykresie 5.1., a całki funkcji temperatury i czasu w zależności od czasu na wykresie 5.18. Na wykresach zauważalny jest moment zniszczenia glifu i przedostania się płomieni w dużym zakresie wewnątrz przestrzeni wentylacyjnej – od około 6'00" minuty. Wyniki wykresów szybko uzyskują stabilizację spowodowaną tym, że okładziny elewacyjne odpadają w całości do około 10'30" minuty, stwarzając potencjalne ogromne zagrożenie. W serii H wykorzystano adhezyjno montaż okładziny elewacyjnej. Faza III występuje od około 12'00" minuty.

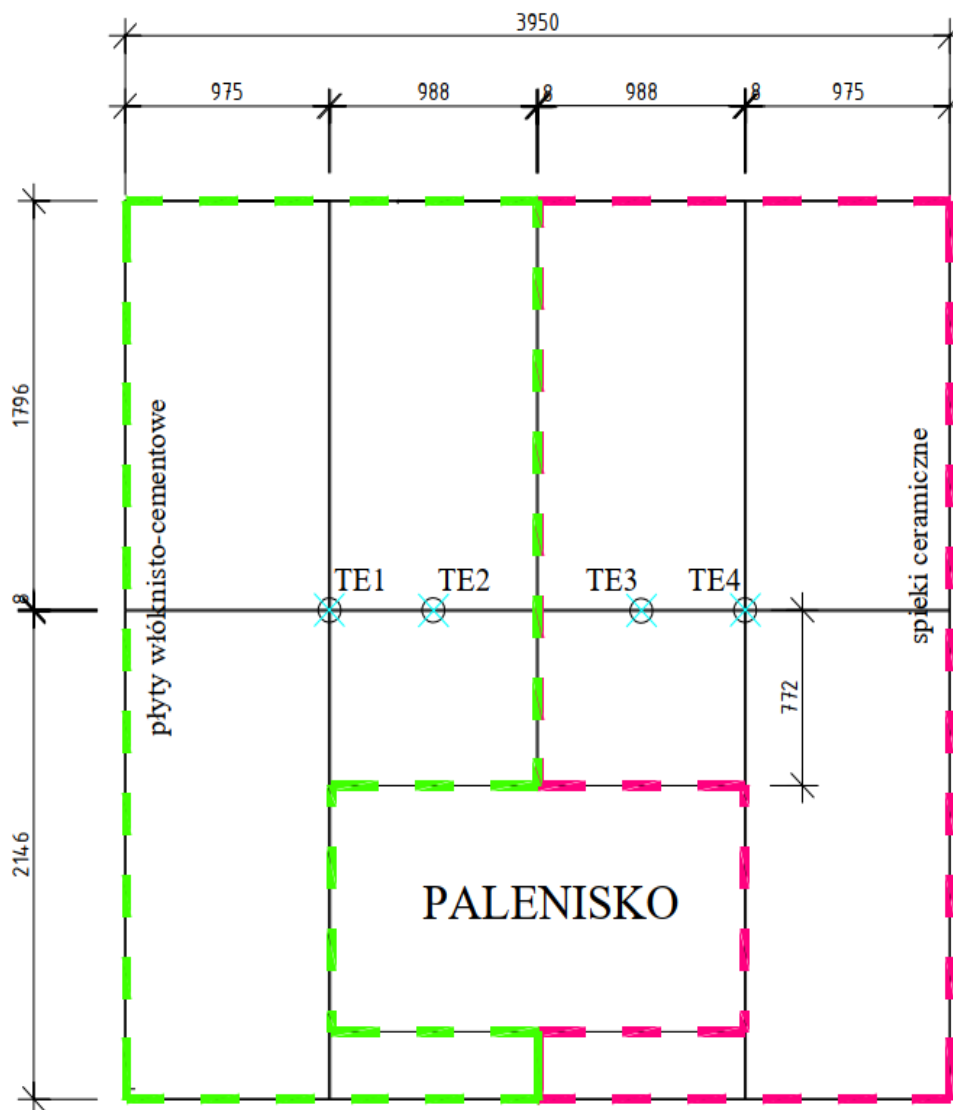


**Wykres 5.17.** Wyniki temperatur dla termopar umieszczonych w przestrzeni wentylacyjnej dla serii badań H



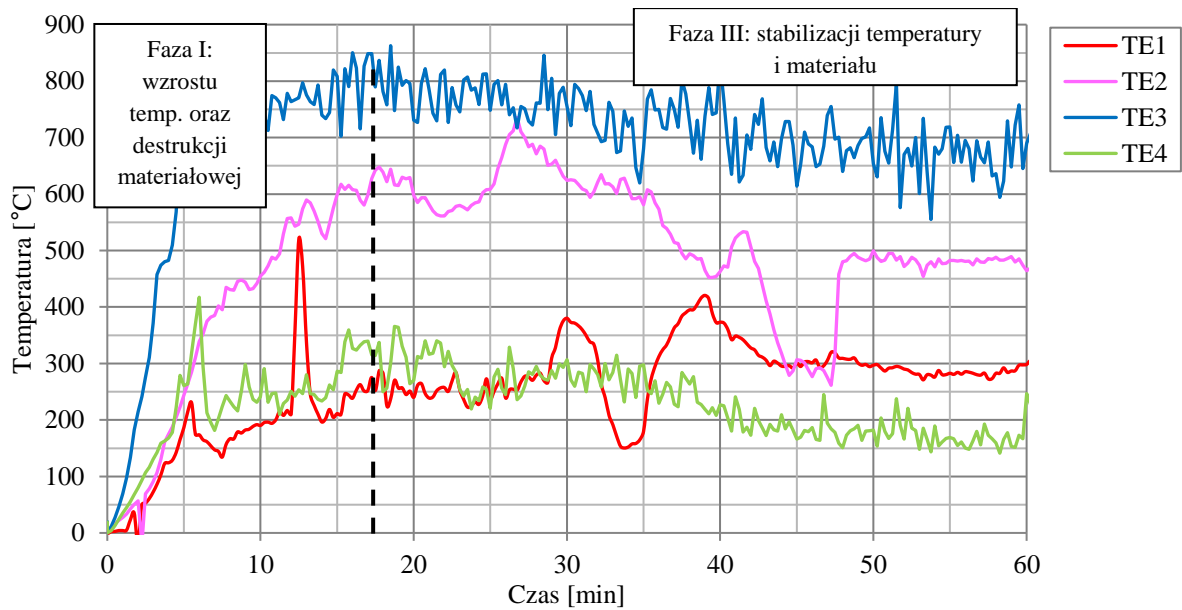
**Wykres 5.18.** Całki funkcji czasu i temperatury dla termopar umieszczonych w przestrzeni wentylacyjnej dla serii badań H

Dla serii badań I model rzeczywisty elewacji wyposażony był w termopary na powierzchni okładziny w lokalizacji 772 mm nad poziomem glifu. Model został wyposażony w cztery termopary umieszczone w czterech kolumnach. Lokalizację rozmieszczenia termopar przedstawiono na rysunku 5.32.

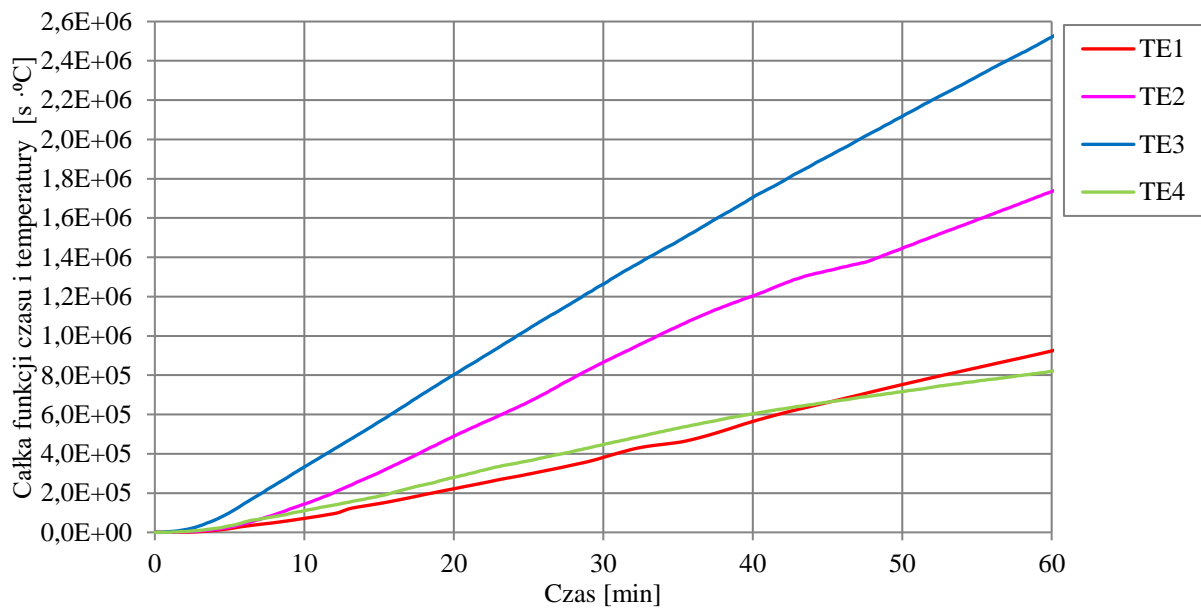


**Rys. 5.32.** Lokalizacja termopar na powierzchni okładzin dla modelu rzeczywistego elewacji dla serii badań I

Wyniki przebiegu temperatury na powierzchni okładziny dla serii badań I przedstawiono na wykresie 5.19. Dodatkowo przedstawiono również całki funkcji temperatury i czasu w zależności od czasu na wykresie 5.20. Zabezpieczenie glifu było wykonane z materiałów okładzinowych, co spowodowało, że faza I trwała długo.



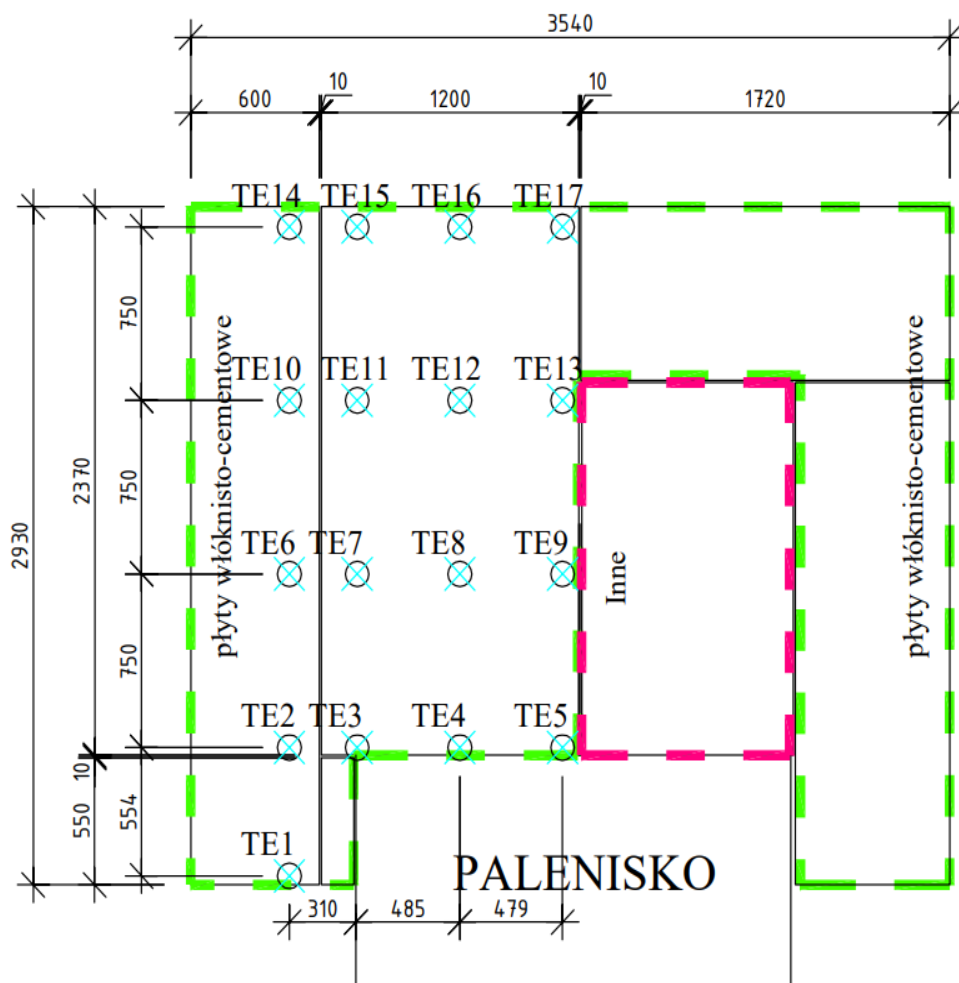
**Wykres 5.19.** Wyniki temperatur dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań I



**Wykres 5.20.** Całki funkcji czasu i temperatury dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań I

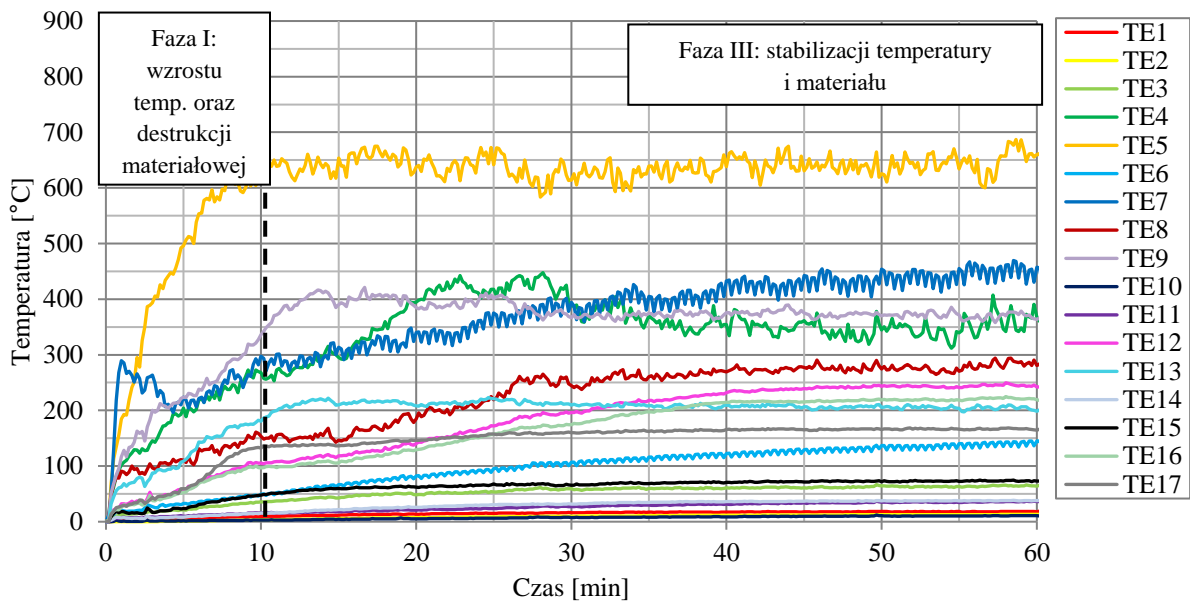
Ostatnim modelem rzeczywistym, który wyposażony był w termopary mierzące przebieg temperatury, był model serii J. Posiadał on zamontowanych 17 termopar, na rysunku 5.3 przedstawiono ich lokalizację. Termopary zamontowano w miejscach, które nie zostały przeanalizowane we wcześniejszych modelach rzeczywistych.



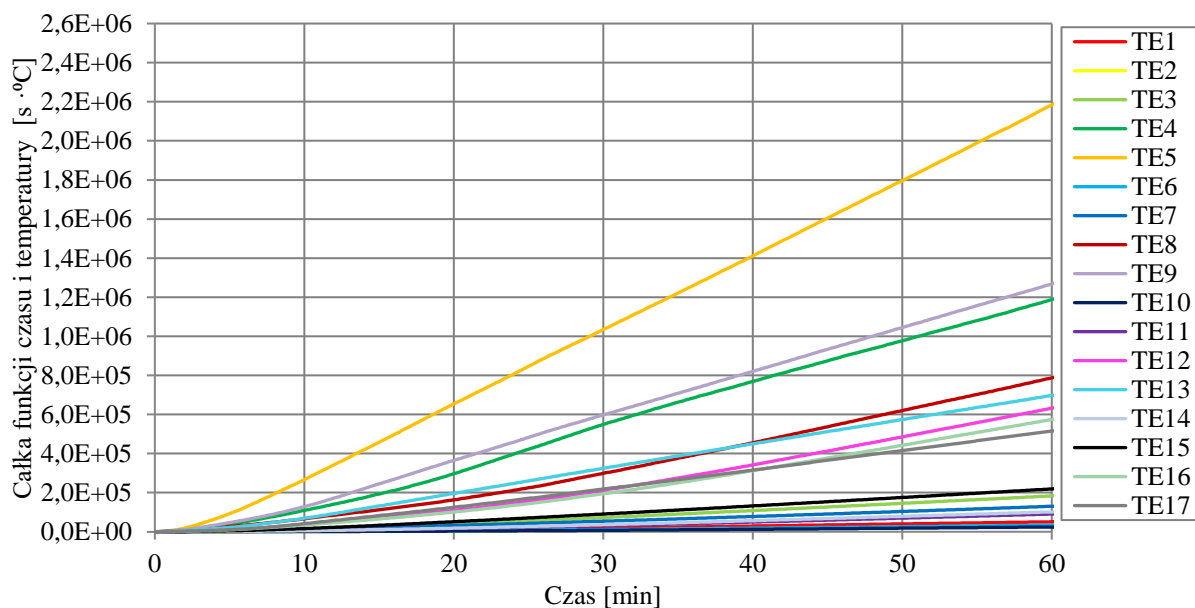


**Rys. 5.33.** Lokalizacja termopar na powierzchni okładziny zewnętrznej dla modelu rzeczywistego elewacji dla serii badań J

Wyniki pomiarów termopar dla serii J przedstawiono na wykresie 5.21. Ponadto, na wykresie 5.22 przedstawiono całkę funkcji temperatury i czasu w zależności od czasu. Wyniki przedstawione na wykresach wskazują stabilny i liniowy przebieg. Tak jak w poprzednich seriach, seria J z uwagi na wykorzystanie okładziny elewacyjnej wykonanej z materiałów niepalnych charakteryzują się pominięciem fazy II. Wyniki przedstawione na wykresach osiągają stabilizację, dzięki dobremu zabezpieczeniu glifu wykorzystującego stopy stali. Zaletą tak wykonanego glifu jest ograniczenie dostawania się płomieni do przestrzeni wentylacyjnej, przez co jej destrukcja jest znacząco ograniczona.



**Wykres 5.21.** Wyniki temperatur dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań J



**Wykres 5.22.** Całki funkcji dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań J

Jak przedstawiono powyżej, wyróżnia się trzy fazy stabilizacji temperatury i destrukcji materiału wpływające na sposób destrukcji elewacji wentylowanej podczas oddziaływania pożarem:

- faza I – faza wzrostu temperatury oraz destrukcji materiałowej;
- faza II – faza pośredniej stabilizacji temperatury i materiału;
- faza III – faza stabilizacji temperatury i materiału.

W przypadku badania modeli rzeczywistych wykorzystujących okładziny wykonane z materiałów niepalnych faza I na powierzchni okładzin występuje wtedy, gdy pojawia się dynamiczny wzrost temperatury, a materiały w sąsiedztwie paleniska bardzo szybko ulegają destrukcji. W przypadku modeli rzeczywistych z dobrze zabezpieczonym glifem, np. poprzez zastosowanie elementów wykonanych ze stali, faza I na powierzchni okładziny trwa do około 10'00" minuty, następnie przechodzi bezpośrednio do fazy III. Pominięcie fazy II jest charakterystyczne dla materiałów niepalnych. W przypadku wykonania glifu z materiałów wykorzystanych na okładziny elewacyjne (spieki ceramiczne, płyty włóknisto-cementowe) faza III na powierzchni okładzin rozpoczyna się z opóźnieniem około 5'00" minut, czyli w około 15'00" minucie badania. Opóźnienie fazy III spowodowane jest niższą wytrzymałością tak wykonanego glifu.

Inny przebieg wykresu ma miejsce w przypadku stosowania okładziny elewacyjnej wykonanej z materiałów palnych, gdzie w większości przypadków na powierzchni okładzin występuje faza II – pośredniej stabilizacji (tak jak w przypadku serii C). Materiały palne dokładają energii do pożaru, a to powoduje, iż nie może on się ustabilizować, co uniemożliwia wystąpienie na powierzchni okładziny fazy III. Odpadanie elementów okładziny elewacyjnej wykonanej z materiałów niepalnych odbywa się głównie w czasie od 7 do 15 minuty (jest to czas na przyjazd służb ratowniczych). W przypadku okładzin elewacyjnych wykonanych z materiałów palnych odpadanie odbywa się w dużo bardziej nieprzewidywalny sposób i często trwa do samego końca badania – z uwagi na możliwość „pnięcia się” płomieni po elewacji.

W przypadku rozwoju pożaru w przestrzeni wentylacyjnej najważniejsze znaczenie ma forma zabezpieczenia glifu – faza I w pustce powietrznej może rozciągać się od kilku, do nawet kilkudziesięciu minut. Słabo zabezpieczone glify, wykonane z materiałów palnych, umożliwiają bardzo szybkie przejścia do fazy III, co w przeciwieństwie do przejścia do fazy III na powierzchni okładziny zewnętrznej jest negatywnym efektem. Takie zjawisko występuje w serii badań H, gdzie faza III w przestrzeni wentylacyjnej występuje zaledwie po kilku minutach, a nastąpiła ona po całkowitym zniszczeniu glifu i wytopieniu wełny mineralnej. Wytopienie wełny umożliwia bezpośredni dostęp do odsłoniętej konstrukcji i wszystkich połączeń utrzymujących elewację wentylowaną – jest to sytuacja niebezpieczna, ponieważ wielokrotnie jest to element determinujący możliwość odpadania okładziny elewacyjnej. W przypadku glifów wykonanych z elementów stalowych, wielokrotnie podczas całości badania nie dochodzi do sytuacji, w której wystąpi faza III w przestrzeni wentylacyjnej. W przypadku serii D zabezpieczenie glifu było wykonane z płyt włóknisto-cementowych, które odpadły, co pozwoliło na swobodne przejście przez trzy fazy.

Przypisanie odpowiednich faz do określonej części wykresu umożliwiło lepsze odniesienie się do globalnej problematyki odpadania okładzin elewacyjnych w warunkach pożaru.

Bardzo istotnym punktem w zakresie zwiększenia bezpieczeństwa elewacji wentylowanej podczas warunków pożaru jest odpowiednie zaprojektowanie i wykonanie glifów, które w znaczący sposób mogą ograniczyć dostęp płomieni do przestrzeni wentylacyjnej. Rozwój pożaru w przestrzeni

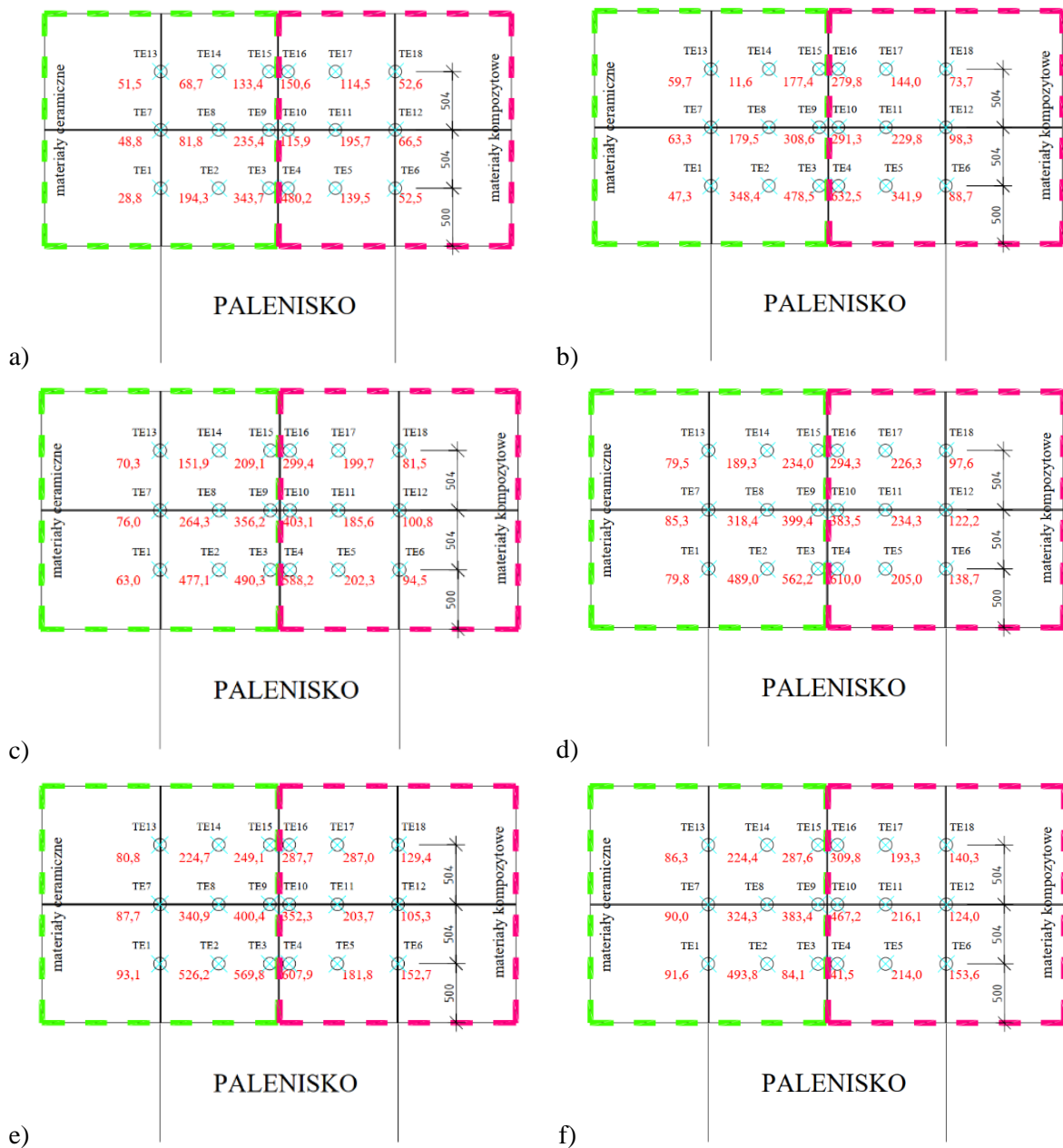
wentylacyjnej przy ograniczonym efekcie kominowym jest bardzo niebezpiecznym zjawiskiem. W przypadku złego rozwiązania glifu, ulega on zniszczeniu przez wysokie temperatury już w początkowej fazie pożaru, kolejno dostanie się płomieni wewnątrz pustki powietrznej powoduje szybkie wytopienie wełny mineralnej (redukując efekt ciągu kominowego). Umożliwia to dostęp wysokich temperatur oraz płomieni do odsłoniętej konstrukcji i strony wewnętrznej okładziny elewacyjnej. Wysokie temperatury w pustce powietrznej powodują odpadanie całości elementów okładzin elewacyjnych. W przypadku oddziaływania na powierzchnię zewnętrzną takie ryzyko jest znacznie niższe. Ponadto, wysokie temperatury powodują znaczną rozszerzalność wszystkich materiałów, a to kolejno może doprowadzić do ścięcia połączeń mechanicznych. Połączenia adhezyjne w obszarze strefy najbardziej narażonej nie powinny być stosowane – są niebezpieczne, ponieważ powodują ryzyko odpadania całości elementów.

### **5.1.12 Lokalne mapy temperatur dla badanych przypadków modeli rzeczywistych elewacji**

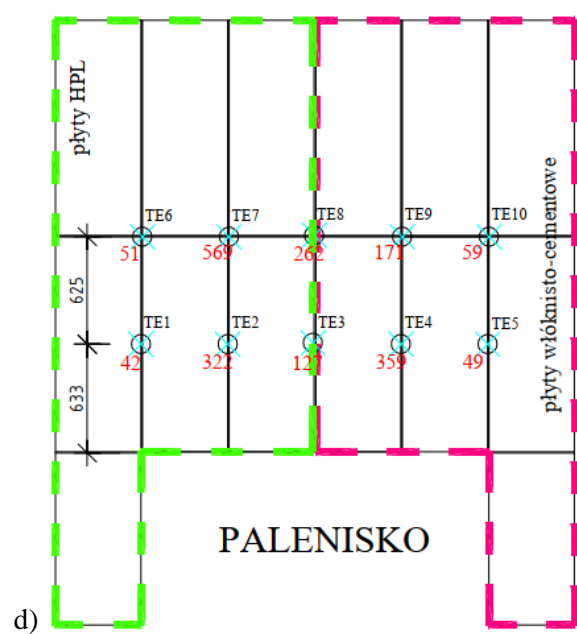
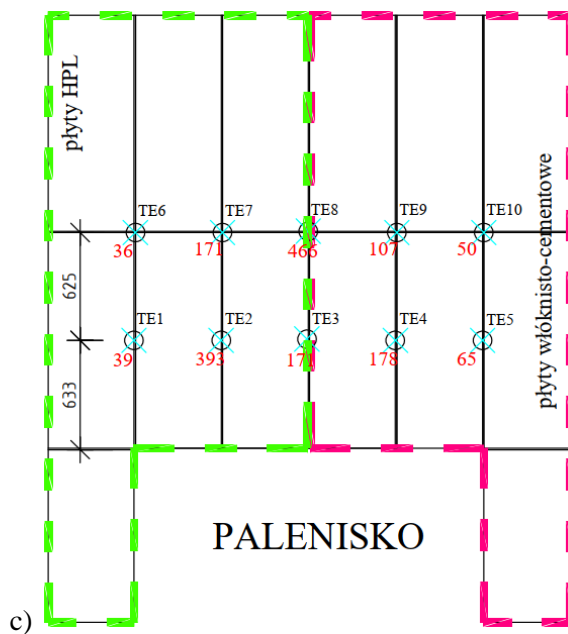
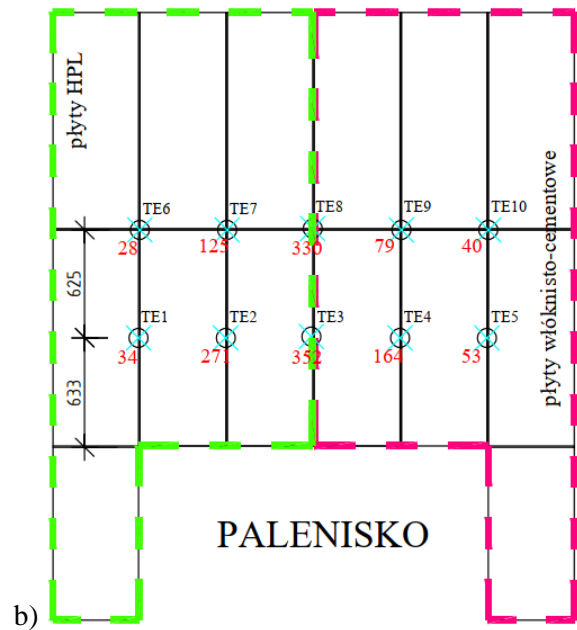
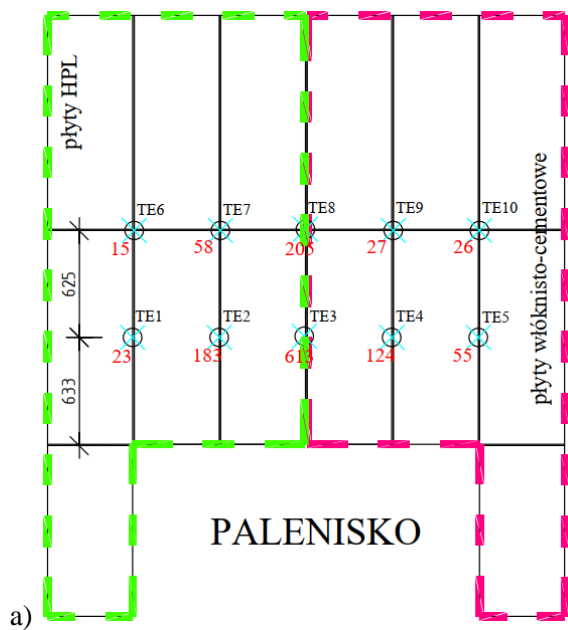
Wyniki temperatury na powierzchni okładzin elewacyjnych z wykresów w pkt 5.1.11 przedstawiono również w formie schematów (map temperatur). Do zestawienia wybrano kolejne minuty, w których odczytano wyniki pomiarów:

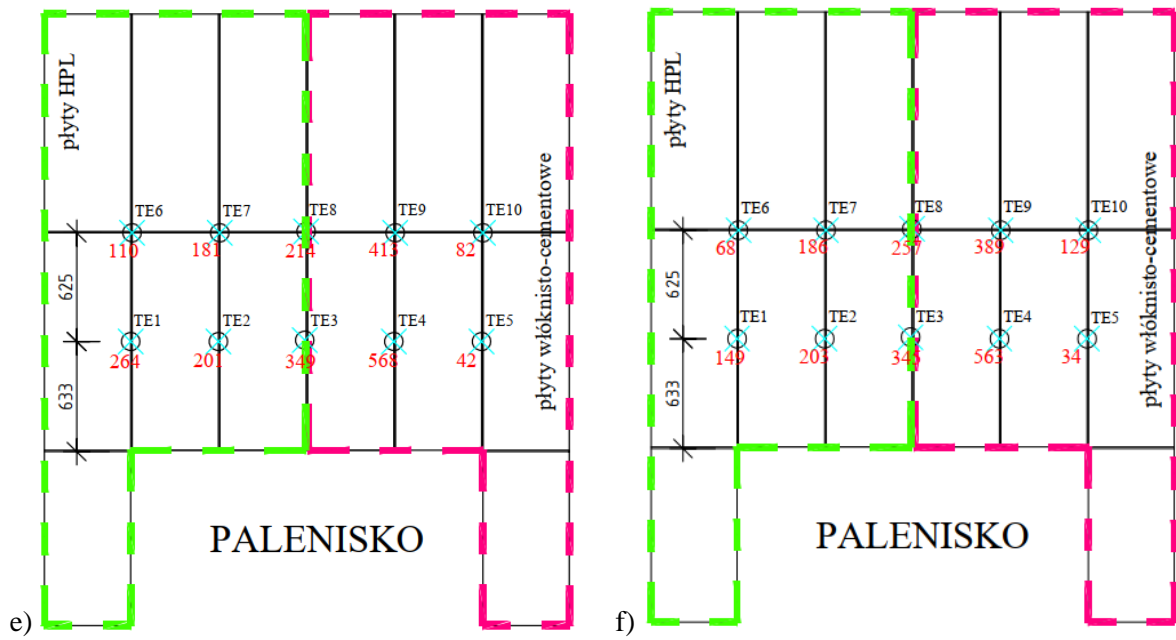
- 1'00" minuta – rozpoczęcie badania, duży wzrost temperatur (faza I – faza wzrostu temp. oraz destrukcji materiałowej);
- 5'00" minuta – dalszy wzrost temperatur – mniej dynamiczny (faza I – faza wzrostu temp. oraz destrukcji materiałowej);
- 10'00" minuta – uzyskiwanie stabilizacji temperaturowej, w przypadku części serii badań jest to moment przejścia z fazy I do kolejnej fazy;
- 20'00" minuta – faza III w przypadku materiałów niepalnych oraz faza II w przypadku materiałów palnych;
- 40'00" minuta – uzyskanie fazy III przez wszystkie serie płyt;
- 60'00" minuta – koniec badania.

Mapy temperatur na powierzchni okładzin zewnętrznych wykonano: dla serii badań B (rysunek 5.34), dla serii badań C (rysunek 5.35), dla serii badań D (rysunek 5.36), dla serii badań H (rysunek 5.37), dla serii badań I (rysunek 5.38), dla serii badań J (rysunek 5.39).

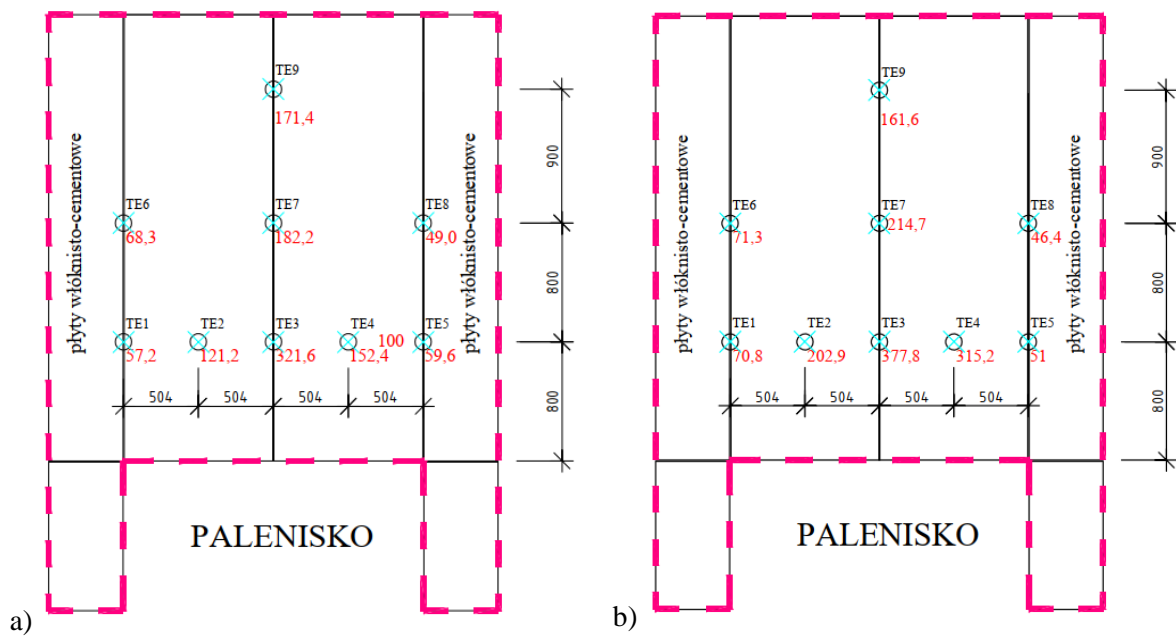


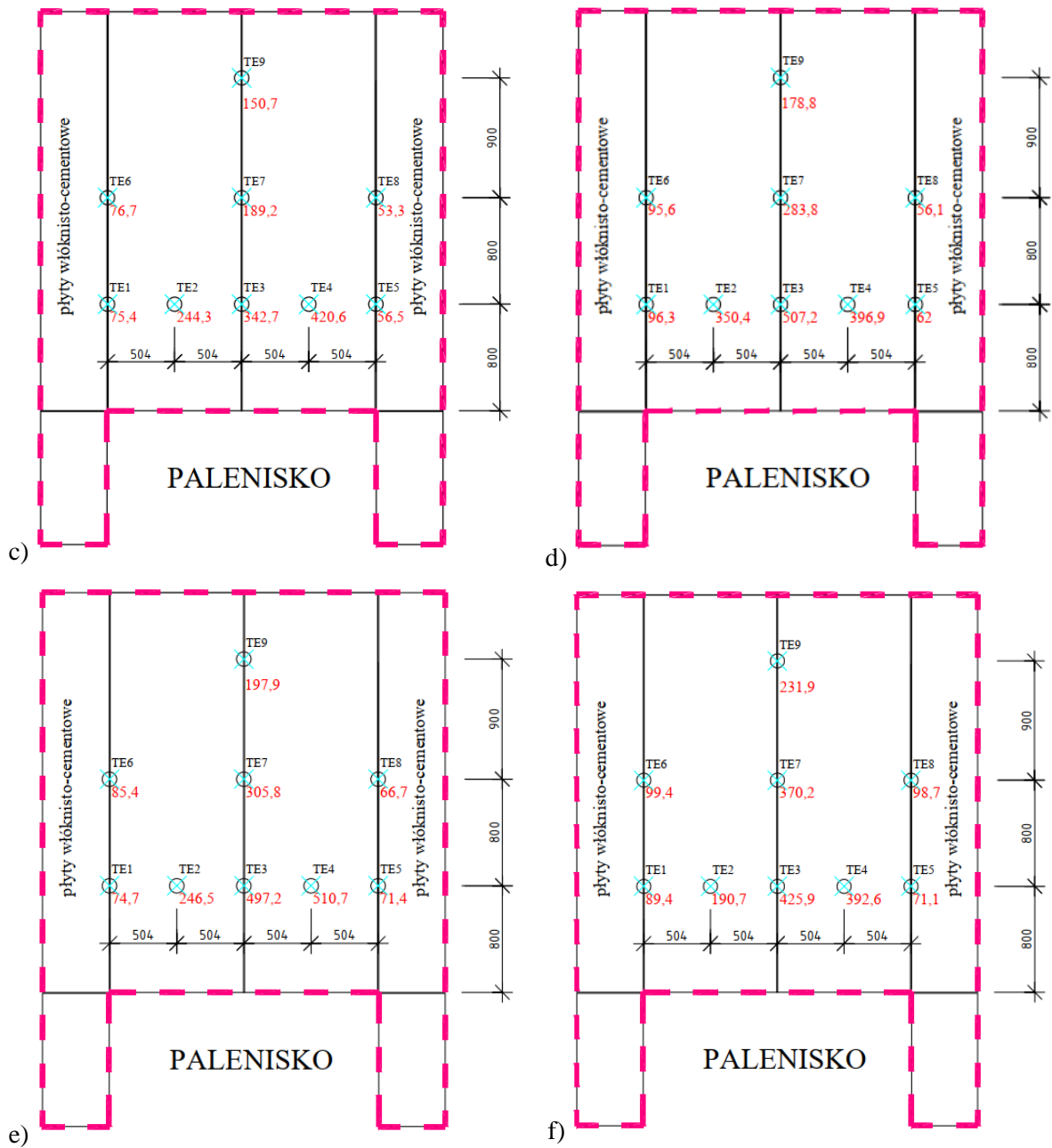
**Rys. 5.34.** Mapy temperatur dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań B: a) w 1'00"; b) w 5'00"; c) w 10'00"; d) w 20'00"; e) w 40'00"; f) w 60'00"





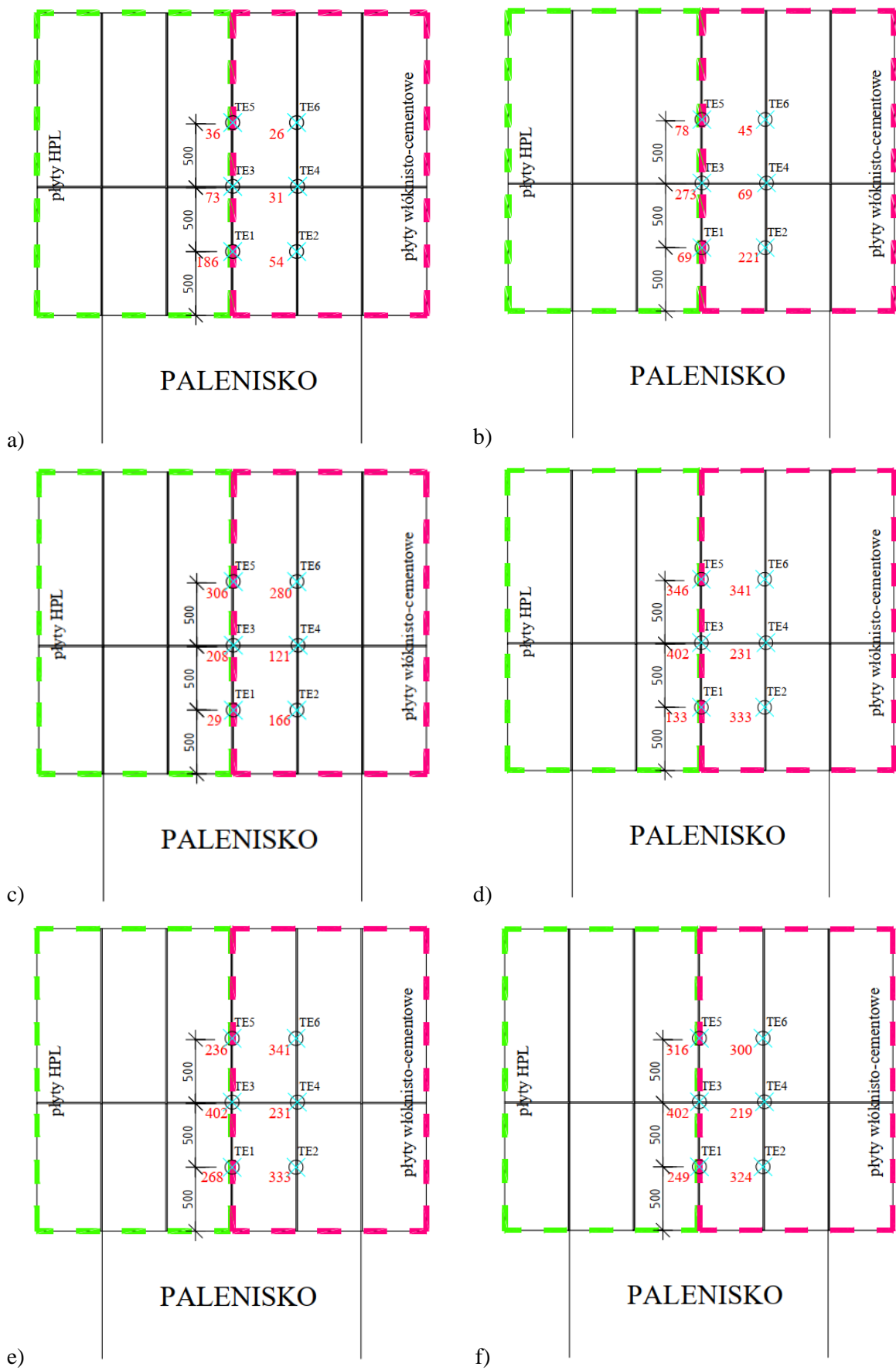
**Rys. 5.35.** Mapy temperatur dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań C: a) w 1'00''; b) w 5'00''; c) w 10'00''; d) w 20'00''; e) w 40'00''; f) w 60'00''



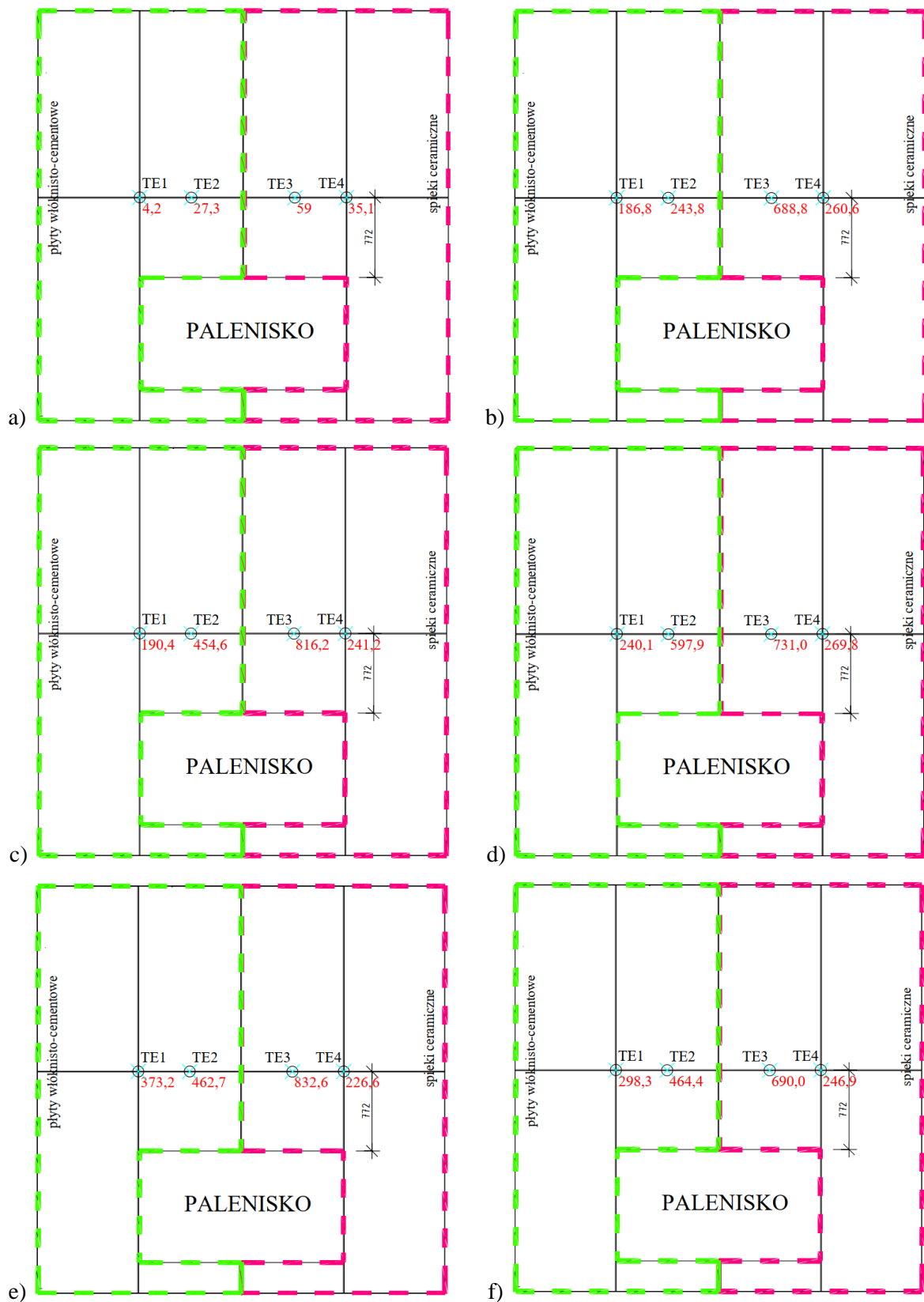


**Rys. 5.36.** Mapy temperatur dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań D: a) w 1'00"; b) w 5'00"; c) w 10'00"; d) w 20'00"; e) w 40'00"; f) w 60'00"

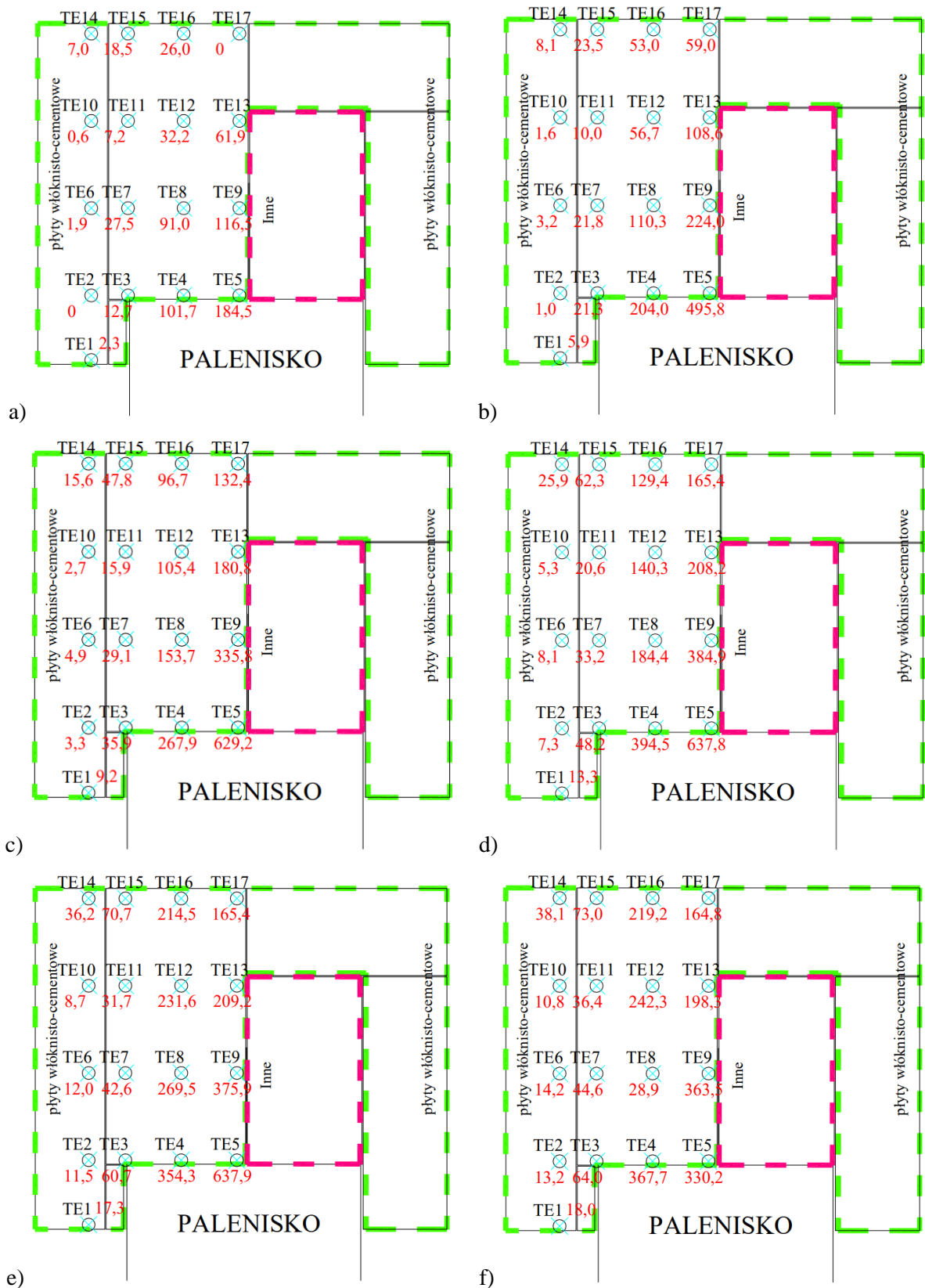




**Rys. 5.37.** Mapy temperatur dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań H: a) w 1'00"; b) w 5'00"; c) w 10'00"; d) w 20'00"; e) w 40'00"; f) w 60'00"

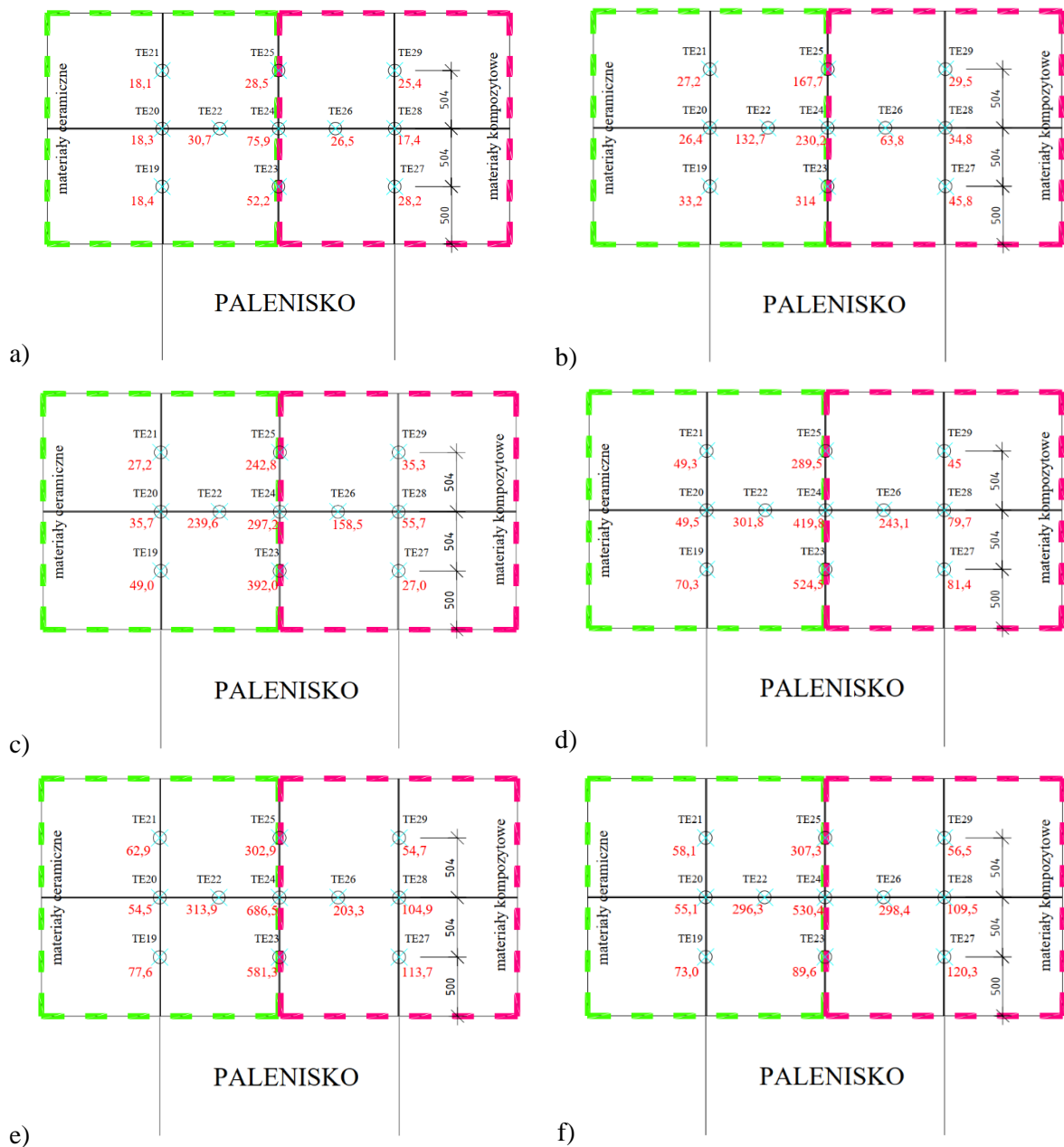


**Rys. 5.38.** Mapy temperatur dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań I: a) w 1'00"; b) w 5'00"; c) w 10'00"; d) w 20'00"; e) w 40'00"; f) w 60'00"

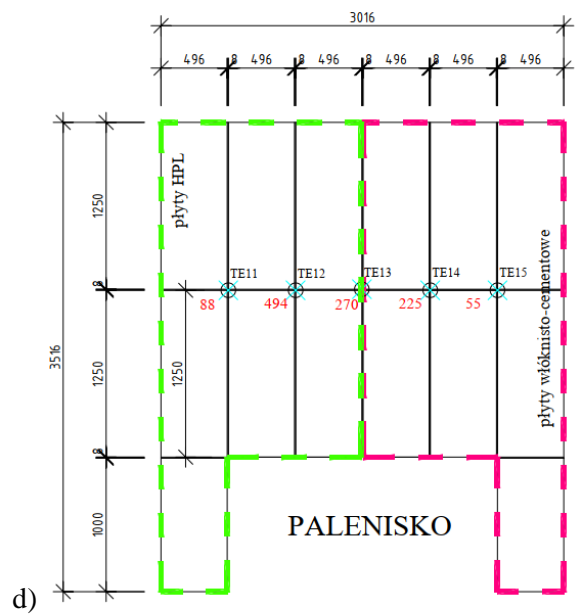
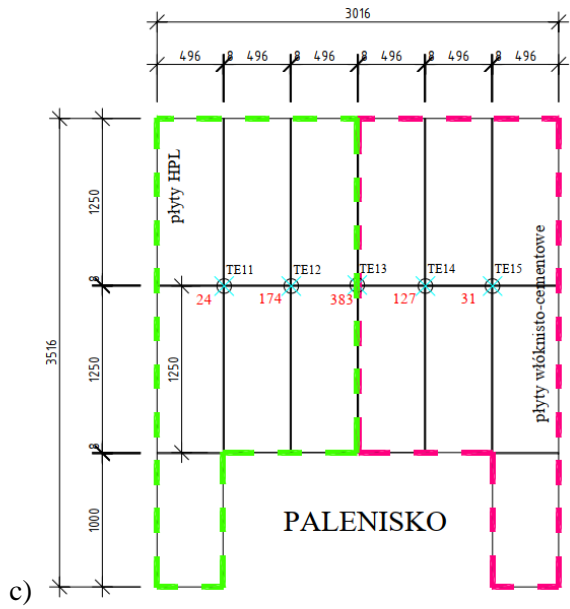
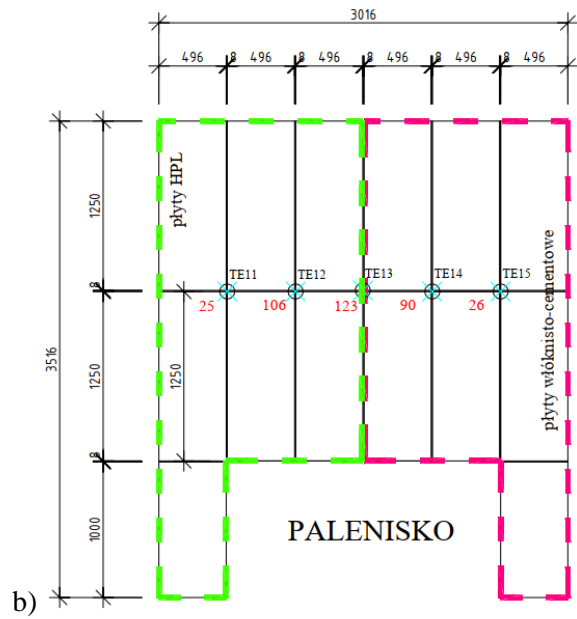
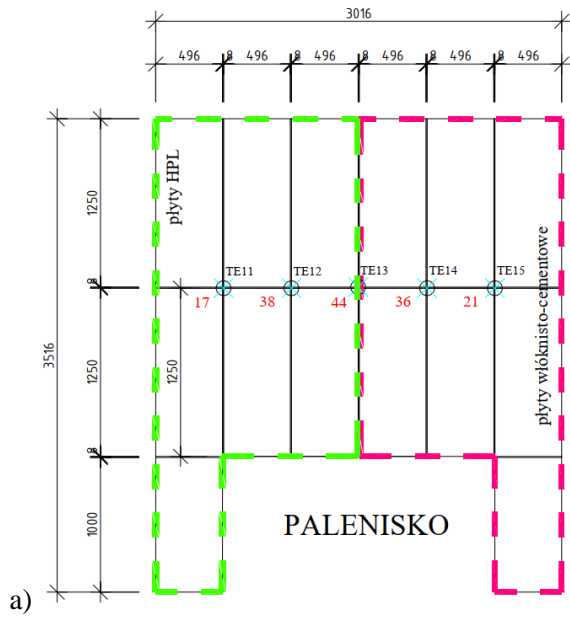


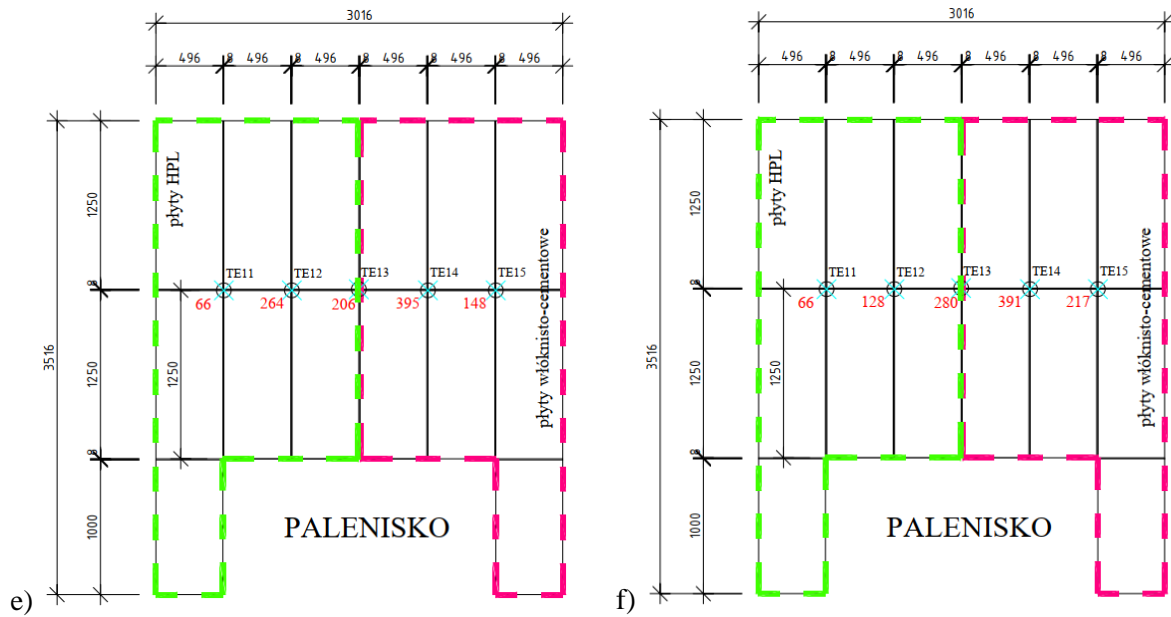
**Rys. 5.39.** Mapy temperatur dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań J: a) w 1'00"; b) w 5'00"; c) w 10'00"; d) w 20'00"; e) w 40'00"; f) w 60'00"

Kolejno otrzymane temperatury z termopar w przestrzeni wentylacyjnej z wykresów w pkt 5.1.11. przedstawiono w formie schematów (map temperatur). Mapy temperatur w przestrzeni wentylacyjnej wykonano: dla serii badań B (rysunek 5.40), dla serii badań C (rysunek 5.41), dla serii badań D (rysunek 5.42), dla serii badań H (rysunek 5.43).

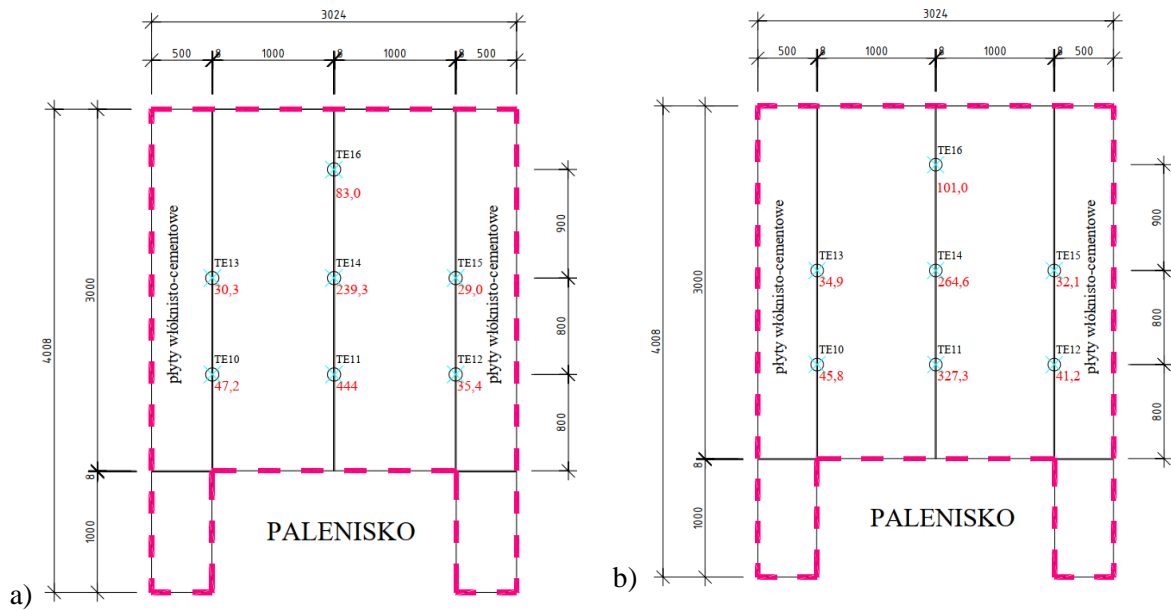


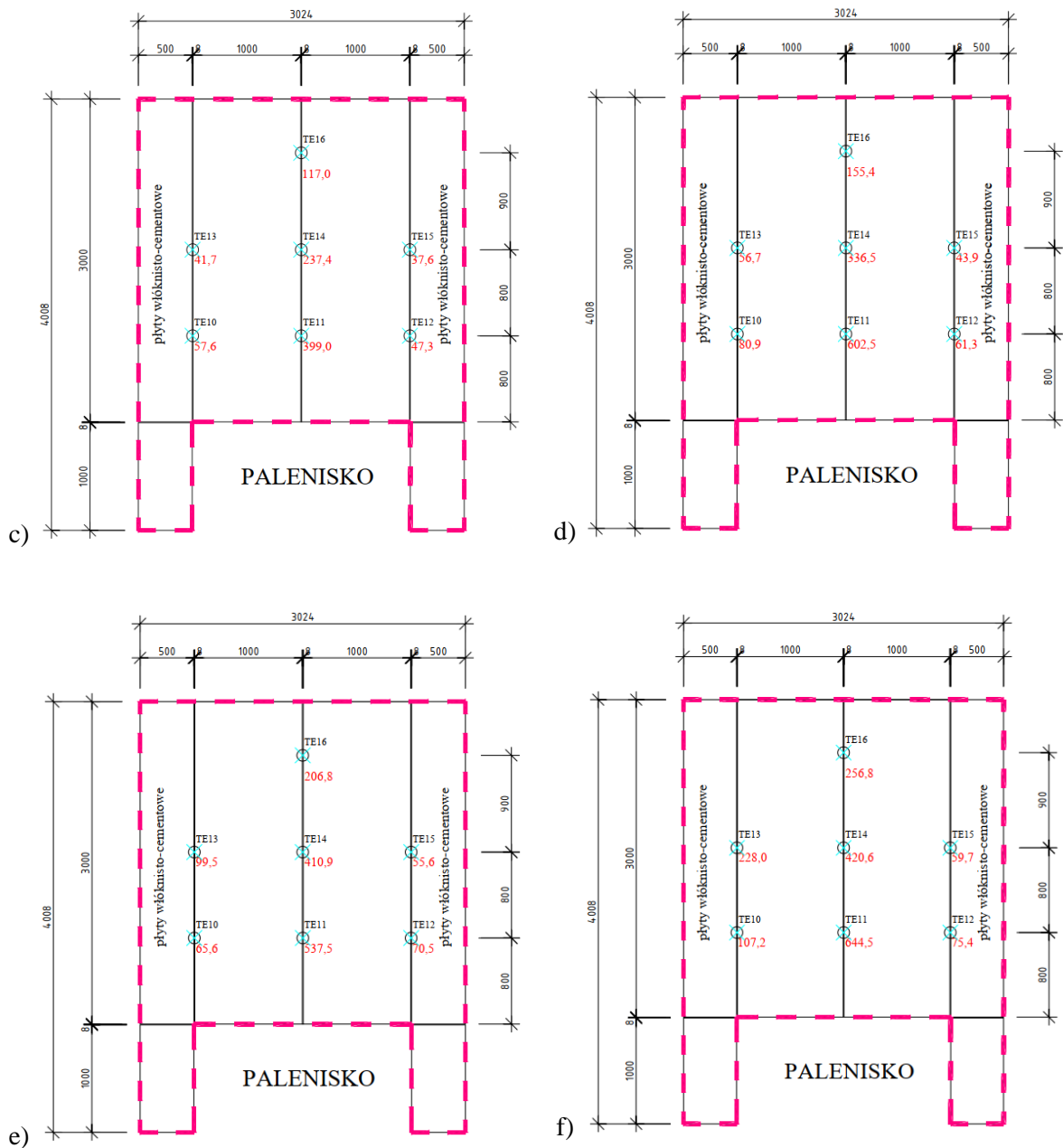
**Rys. 5.40.** Mapy temperatur dla termopar umieszczonych w przestrzeni wentylacyjnej dla serii badań B: a) w 1'00"; b) w 5'00"; c) w 10'00"; d) w 20'00"; e) w 40'00"; f) w 60'00"



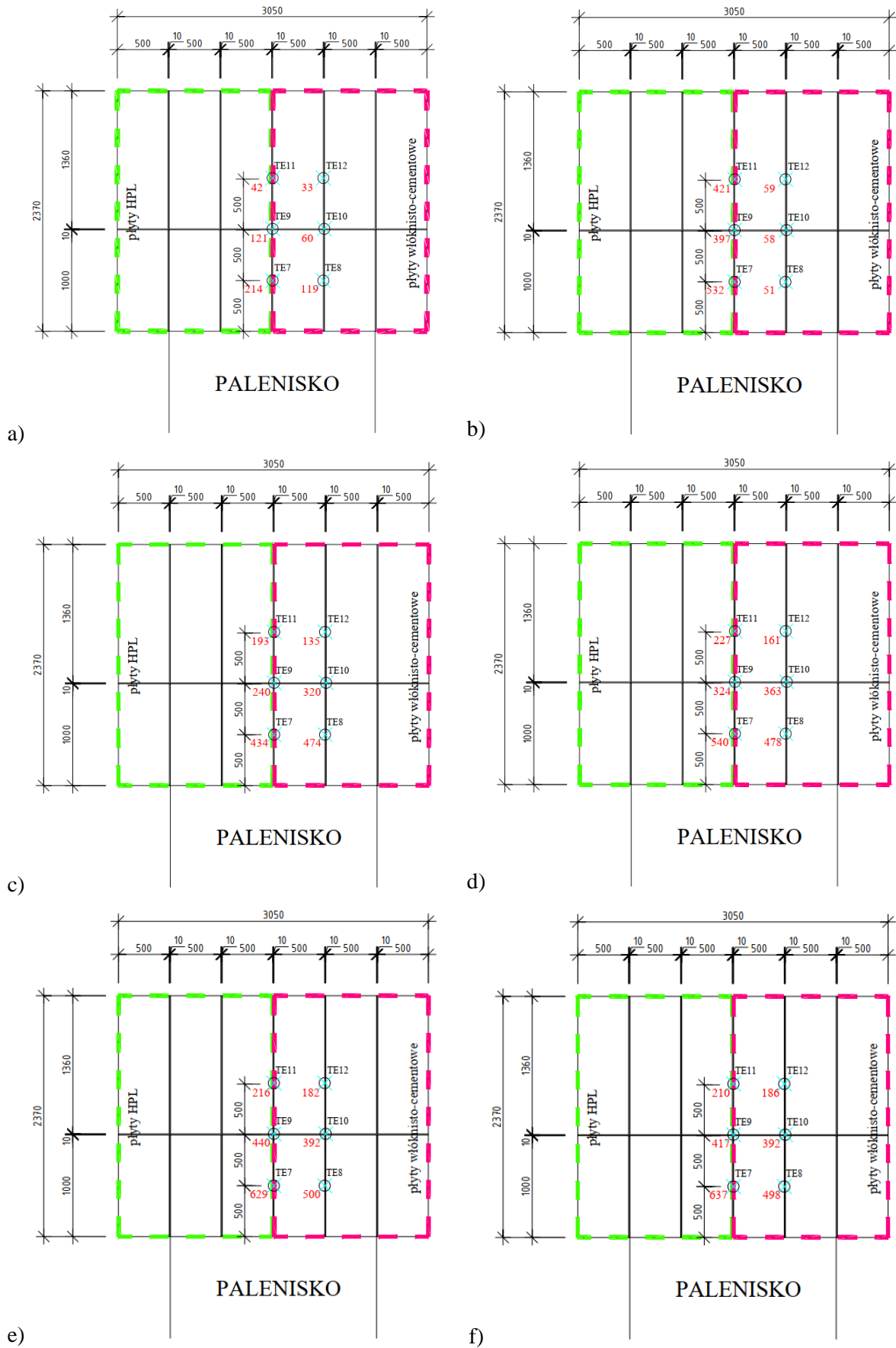


**Rys. 5.41.** Mapy temperatur dla termopar umieszczonych w przestrzeni wentylacyjnej dla serii badań C: a) w 1'00''; b) w 5'00''; c) w 10'00''; d) w 20'00''; e) w 40'00''; f) w 60'00''





**Rys. 5.42.** Mapy temperatur dla termopar umieszczonych w przestrzeni wentylacyjnej dla serii badań D: a) w 1'00"; b) w 5'00"; c) w 10'00"; d) w 20'00"; e) w 40'00"; f) w 60'00"



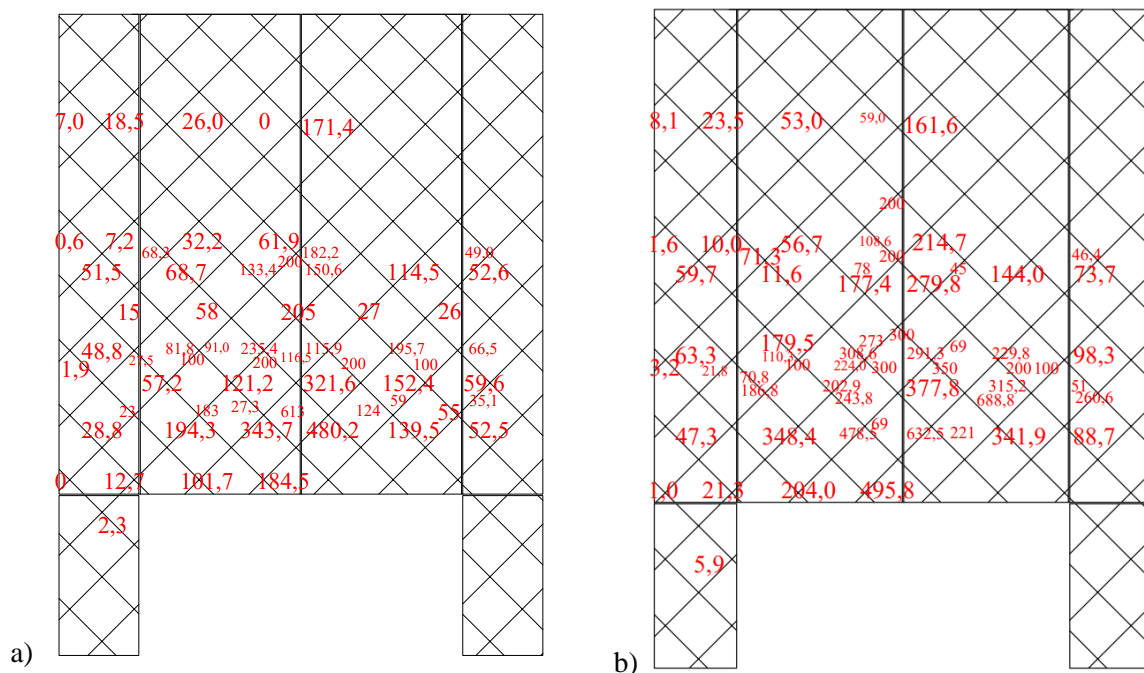
**Rys. 5.43.** Mapy temperatur dla termopar umieszczonych w przestrzeni wentylacyjnej dla serii badań  
H: a) w 1'00"; b) w 5'00"; c) w 10'00"; d) w 20'00"; e) w 40'00"; f) w 60'00"

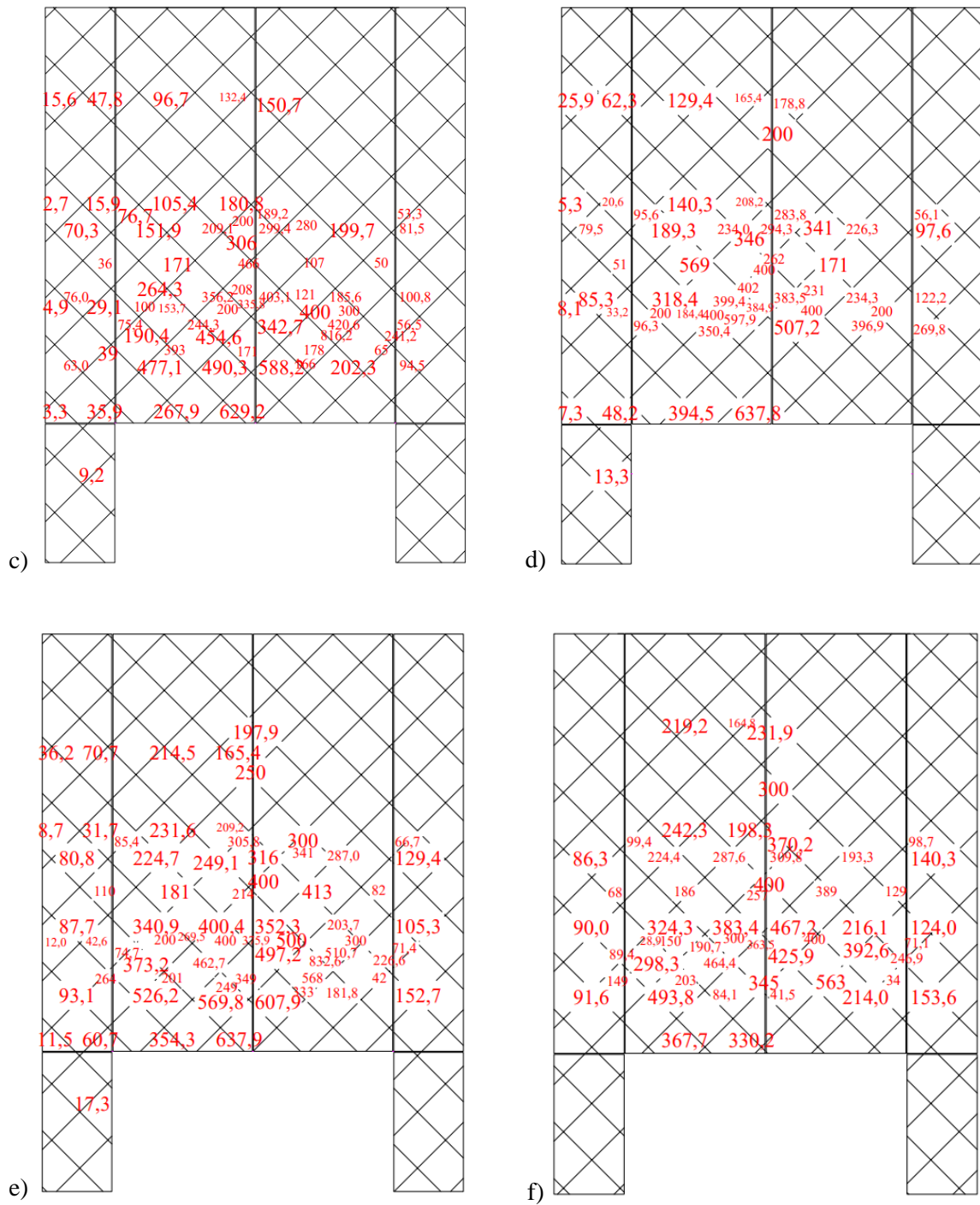


### 5.1.13 Globalne mapy temperatur dla badanych przypadków modeli rzeczywistych elewacji

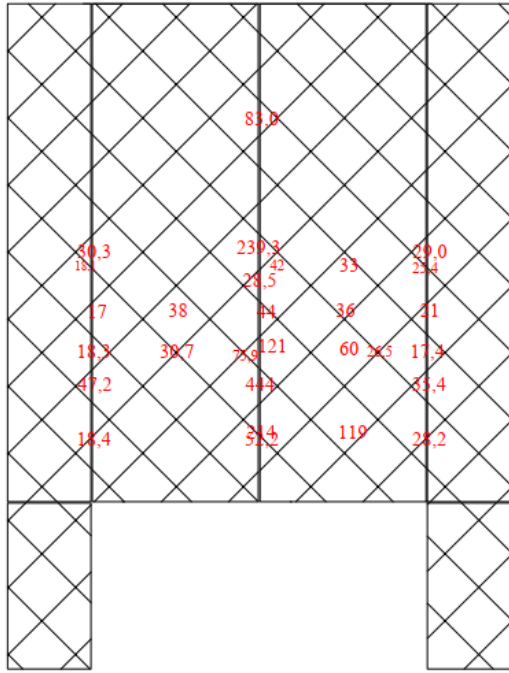
Globalne mapy temperatur opracowano łącząc ze sobą lokalne mapy temperatur poszczególnych serii badań przedstawionych w poprzednim rozdziale. Do utworzenia ich wykorzystano serie z okładzinami wykonanymi z płyt włóknisto-cementowych oraz innych materiałów sklasyfikowanych jako niepalne o podobnym sposobie zachowania się w warunkach pożaru (spieki ceramiczne – serie badań: B.1, I.1). Klasyfikacja materiałów do poszczególnych grup palności odbywa się z zastosowaniem normy zharmonizowanej, wobec czego dodanie materiałów ceramicznych do grupy badań, z których wykonano globalne mapy temperatur, poszerzyło próbę i dało więcej danych odnośnie temperatur panujących na modelu rzeczywistym. Materiały palne odrzucono z uwagi na temat realizowanej rozprawy doktorskiej, gdzie skoncentrowano się na płytach włóknisto-cementowych, czyli materiale scharakteryzowanym jako niepalny.

Mapy globalne temperatur wykonano dla powierzchni okładziny elewacyjnej (rysunek 5.44) oraz w przestrzeni wentylacyjnej (rysunek 5.45).

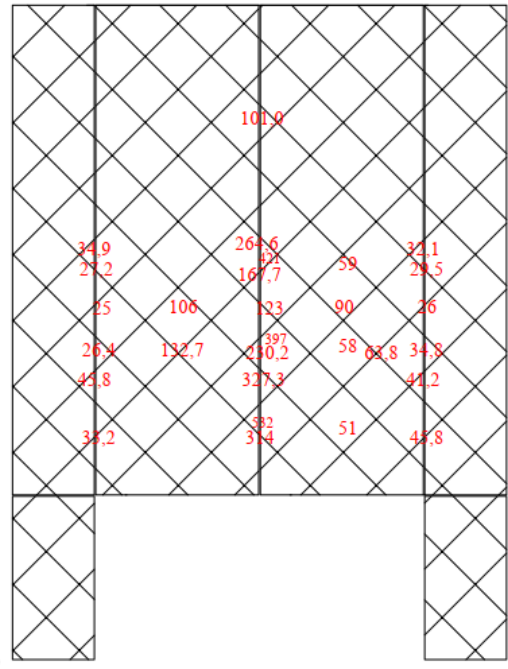




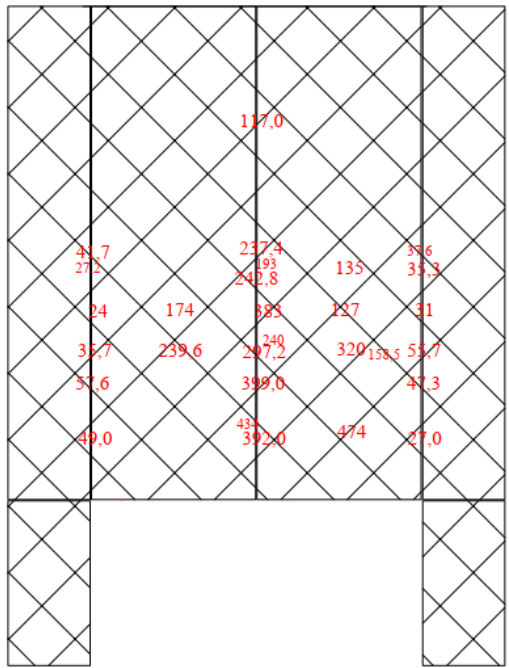
**Rys. 5.44.** Mapy temperatur globalnych dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej: a) w 1'00"; b) w 5'00"; c) w 10'00"; d) w 20'00"; e) w 40'00"; f) w 60'00"



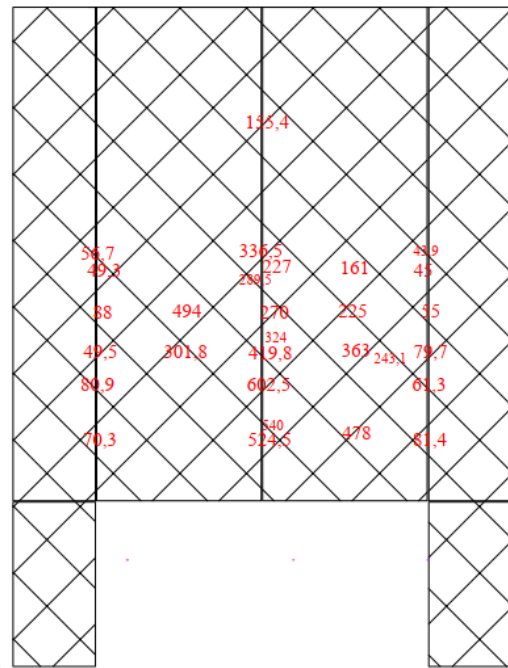
a)



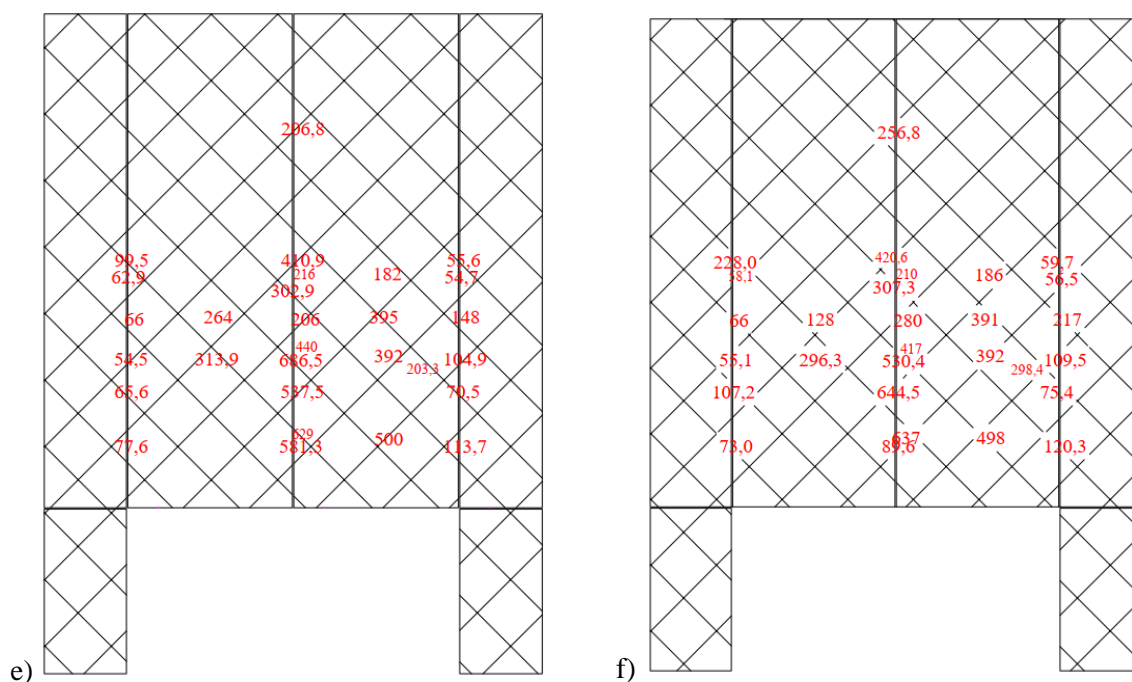
b)



c)



d)



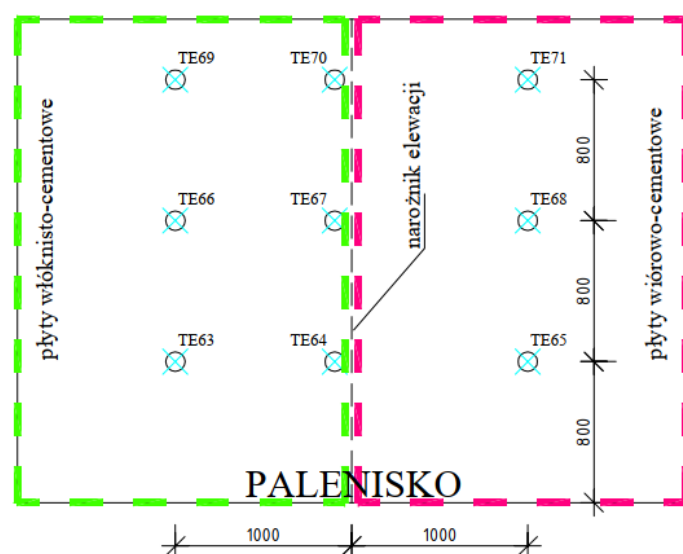
**Rys. 5.45.** Mapy temperatur globalnych dla termopar umieszczonych w przestrzeni wentylacyjnej:  
 a) w 1'00''; b) w 5'00''; c) w 10'00''; d) w 20'00''; e) w 40'00''; f) w 60'00''

Powyżej przedstawiono wartości temperatur odczytane z termopar różnych modeli rzeczywistych z okładzinami elewacyjnymi niepalnymi wykonanymi z płyt włóknisto-cementowych i spieków ceramicznych. Mapy temperatur globalnych zostały przygotowane dla powierzchni okładziny elewacyjnej i dla przestrzeni wentylacyjnej. Na ich podstawie wykonano mapy destrukcji okładziny i opracowano wnioski odnośnie krytycznej strefy destrukcji. Zauważalne jest, iż pomimo stałego źródła ognia temperatura w poszczególnych strefach wzrasta wraz z czasem pożaru, co jest spowodowane destrukcją przede wszystkim przestrzeni wentylacyjnej (pustki powietrznej). Postępująca destrukcja okładziny elewacyjnej ma marginalne znaczenie w zakresie wzrostu odczytów z termopar. Kluczowym aspektem jest wytapiająca wełna mineralna która to zmniejsza efekt ciągu kominowego, płomienie i gorące gazy z uwagi na większą przestrzeń, przepływają z mniejszą prędkością i utrzymują się w niej dłużej. Ma to wpływ na wzrost temperatury w pustce powietrznej. Zmniejszenie efektu ciągu kominowego w przestrzeni wentylacyjnej i będące jego następstwem zwiększenie temperatury wewnątrz niej powodują negatywne skutki m.in. dla podkonstrukcji, połączeń podkonstrukcji z okładzinami elewacyjnymi i okładzin elewacyjnych.

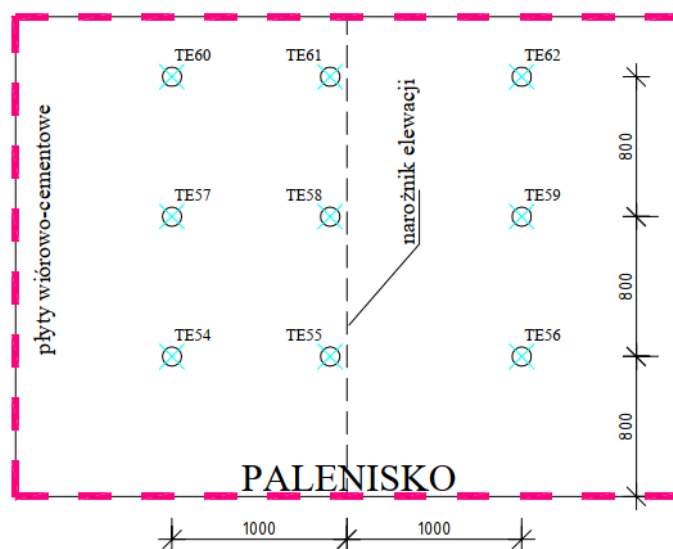
Globalne mapy temperatur wskazują temperatury w danej fazie pożaru, przez co mogą stanowić podstawę do projektowania połączeń i podkonstrukcji dla poszczególnych elementów kompletnego systemu elewacji wentylowanej w zadanej lokalizacji. Takie elementy należałoby po zaprojektowaniu poddać badaniom na modelach rzeczywistych celem weryfikacji przyjętych założeń i rozwiązań.

### 5.1.14 Wyniki z termopar dla badanych przypadków elewacji na budynku modelowym

Tak samo jak dla modeli rzeczywistych, również w przypadku budynku modelowego serii badań F i G zamontowano termopary podczas badania oddziaływania pożarem. Lokalizacje termopar wskazano na rysunkach 5.46 i 5.47. Palenisko było zlokalizowane w narożniku, a jako źródła ognia posłużyły belki drewniane. Czas badania trwał około 13'30" minut i zakończył się, gdy wykorzystane zostało całe paliwo – belki drewniane. Źródła paleniska dla obu serii były identyczne. Źródłem paleniska były belki drewniane (tak jak opisano to w rozdziale 3.12.), które to odwzorowywały łóżeczko dziecięce.

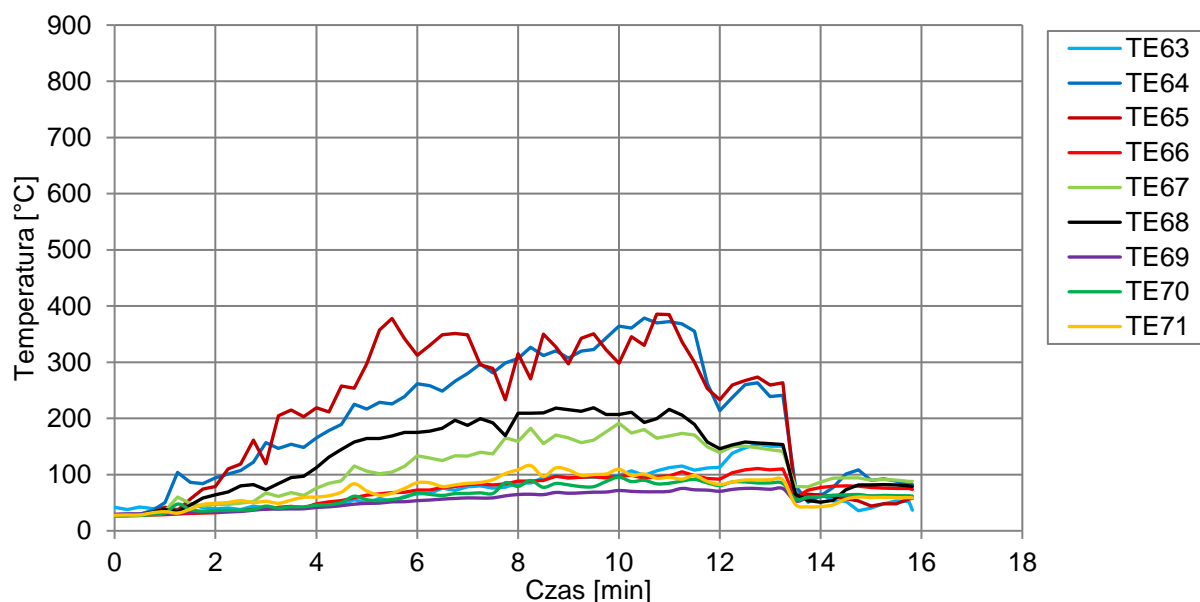


Rys. 5.46. Lokalizacja termopar na powierzchni okładziny zewnętrznej dla budynku modelowego dla serii badań F

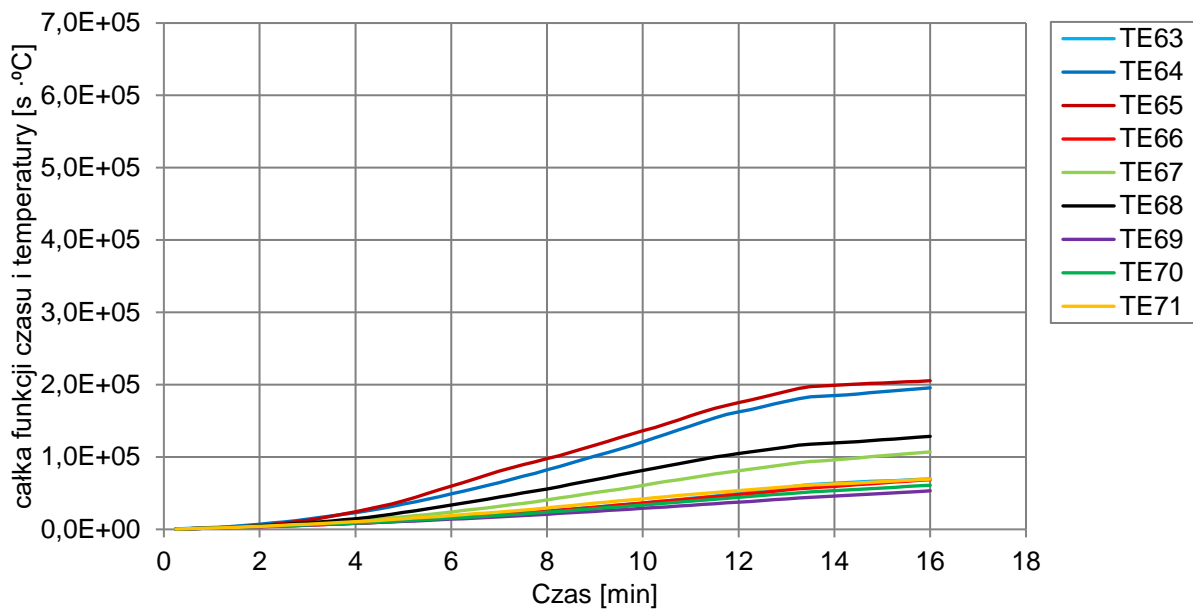


Rys. 5.47. Lokalizacja termopar na powierzchni okładzin dla budynku modelowego dla serii badań G

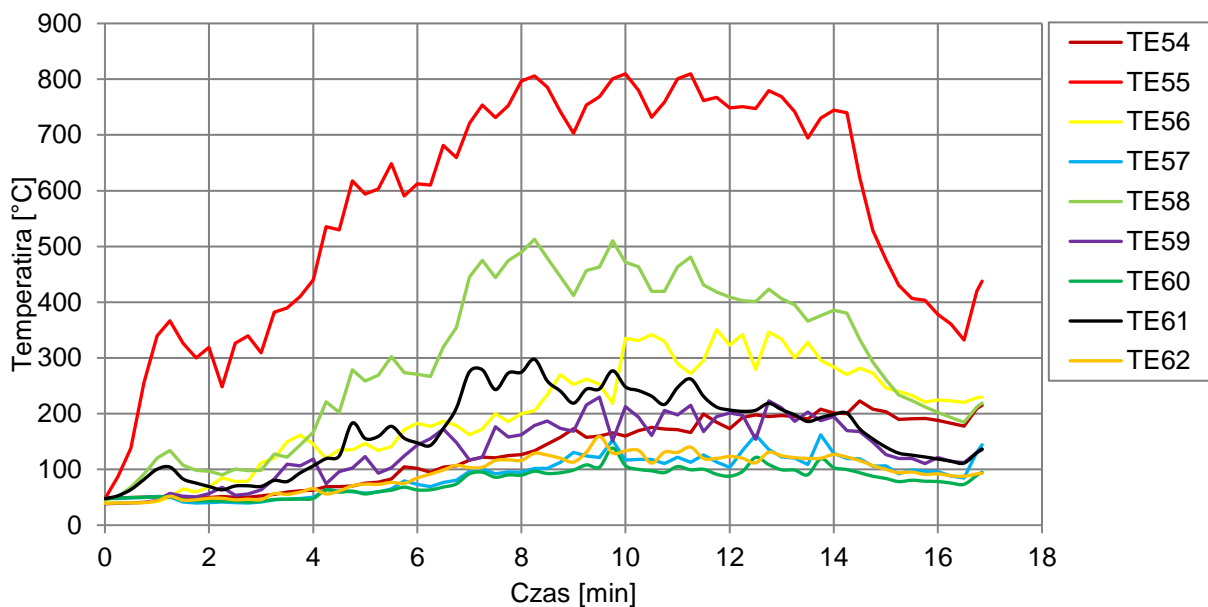
Odczyty wartości temperatur z termopar dla serii badań F i G przedstawiono odpowiednio na wykresach 5.23 i 5.25. Całki funkcji temperatury i czasu w zależności od czasu przedstawiono na wykresach 5.24 dla serii badań F i 5.26 dla serii badań G. Zauważalne są znaczne różnice w rozwoju i intensywności pożaru dla tych dwóch serii. Wskazuje to na ogromne znaczenie warunków zewnętrznych podczas ich trwania. Badania tych dwóch serii odbywały się dzień po dniu. W przypadku badania serii F utrzymywał się silny wiatr, który ograniczał i stopował rozwój pożaru, czego nie było w przypadku pożaru dla serii G. Termopara centralna dla serii G o oznaczeniu TE55 wskazywała maksymalną temperaturę 810°C w stosunku do termopary centralnej dla serii F TE64, która wskazywała temperaturę jedynie 390°C. Tak znacząca różnica jest także w przypadku całki funkcji czasu i temperatury, która dla termopary TE55 (wykres 5.24) jest ponad dwa razy większa i wynosi około  $6,0 \cdot 10^{-5} \text{ s} \cdot ^\circ\text{C}$  w stosunku do około  $2,0 \cdot 10^{-5} \text{ s} \cdot ^\circ\text{C}$  dla termopary TE64 (wykres 5.26).



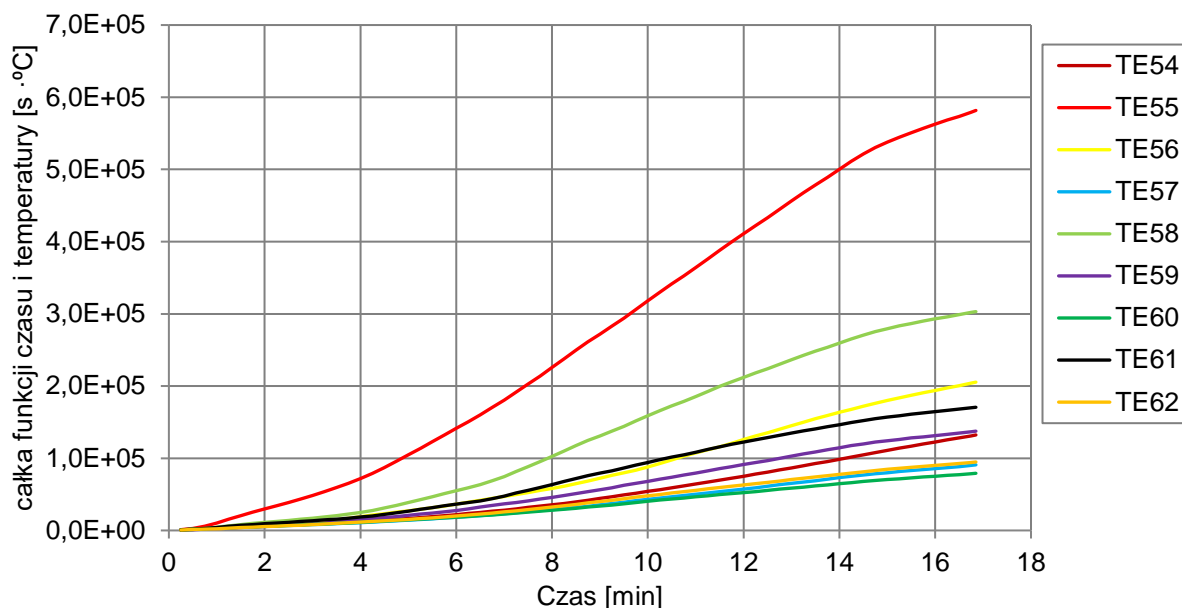
**Wykres 5.23.** Wyniki temperatur dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań F



**Wykres 5.24.** Całki funkcji czasu i temperatury dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań F



**Wykres 5.25.** Wyniki temperatur dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań G



**Wykres 5.26.** Całki funkcji czasu i temperatury dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań G

### 5.1.15 Lokalne mapy temperatur dla badanych przypadków elewacji na budynku modelowym

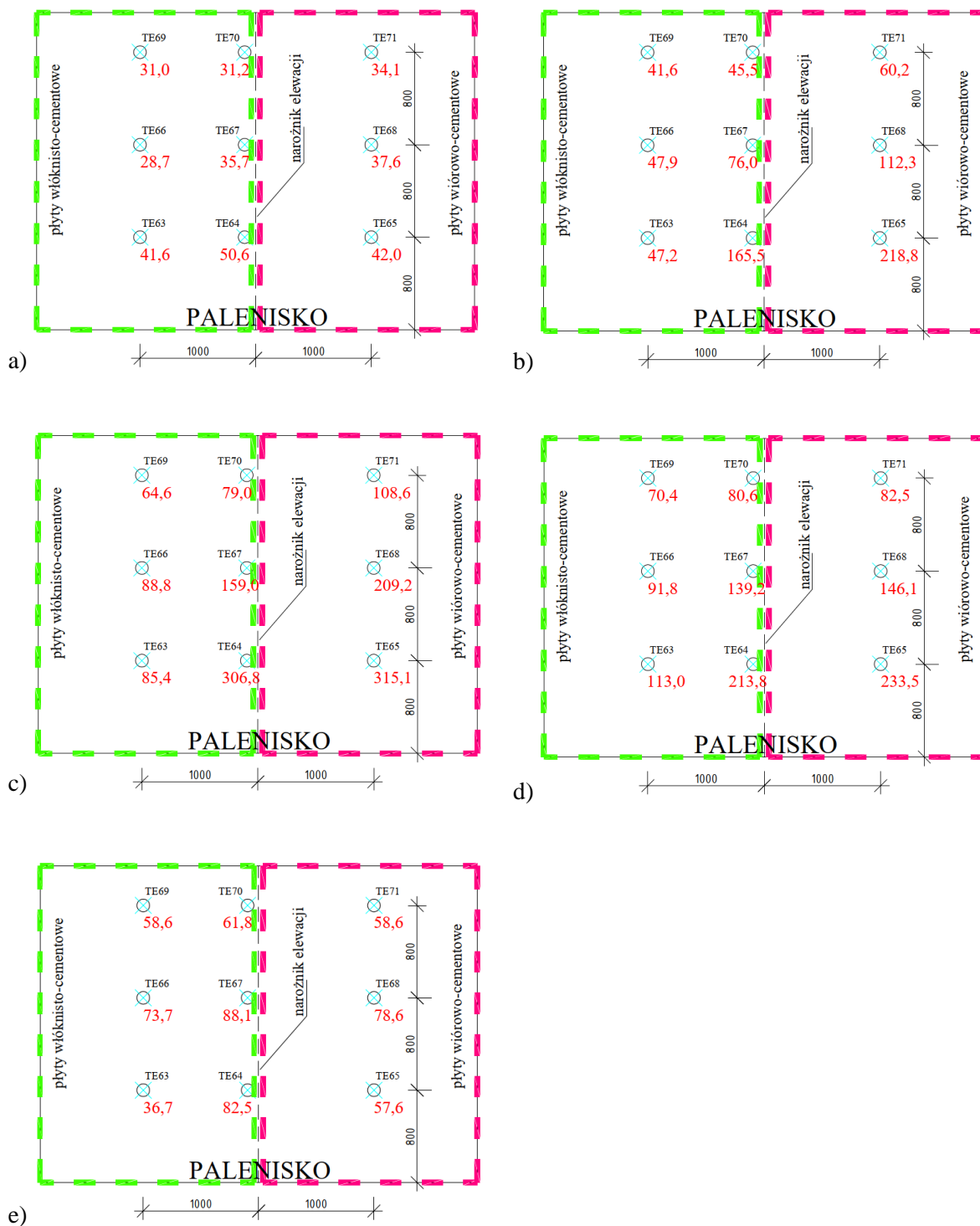
Wyniki temperatury na powierzchni okładziny zewnętrznej z powyższych wykresów przedstawiono również w formie schematów – map temperatur. Przedstawiono je w minutach: 1'00", 4'00", 8'00", 12'00", 16'00". W przypadku serii F i serii G badanie trwało w przedziale 13'30" – 17'00" minut.

Schematy w postaci map temperatur dla serii badań F i G przedstawiono odpowiednio na rysunkach: 5.48 i 5.49.

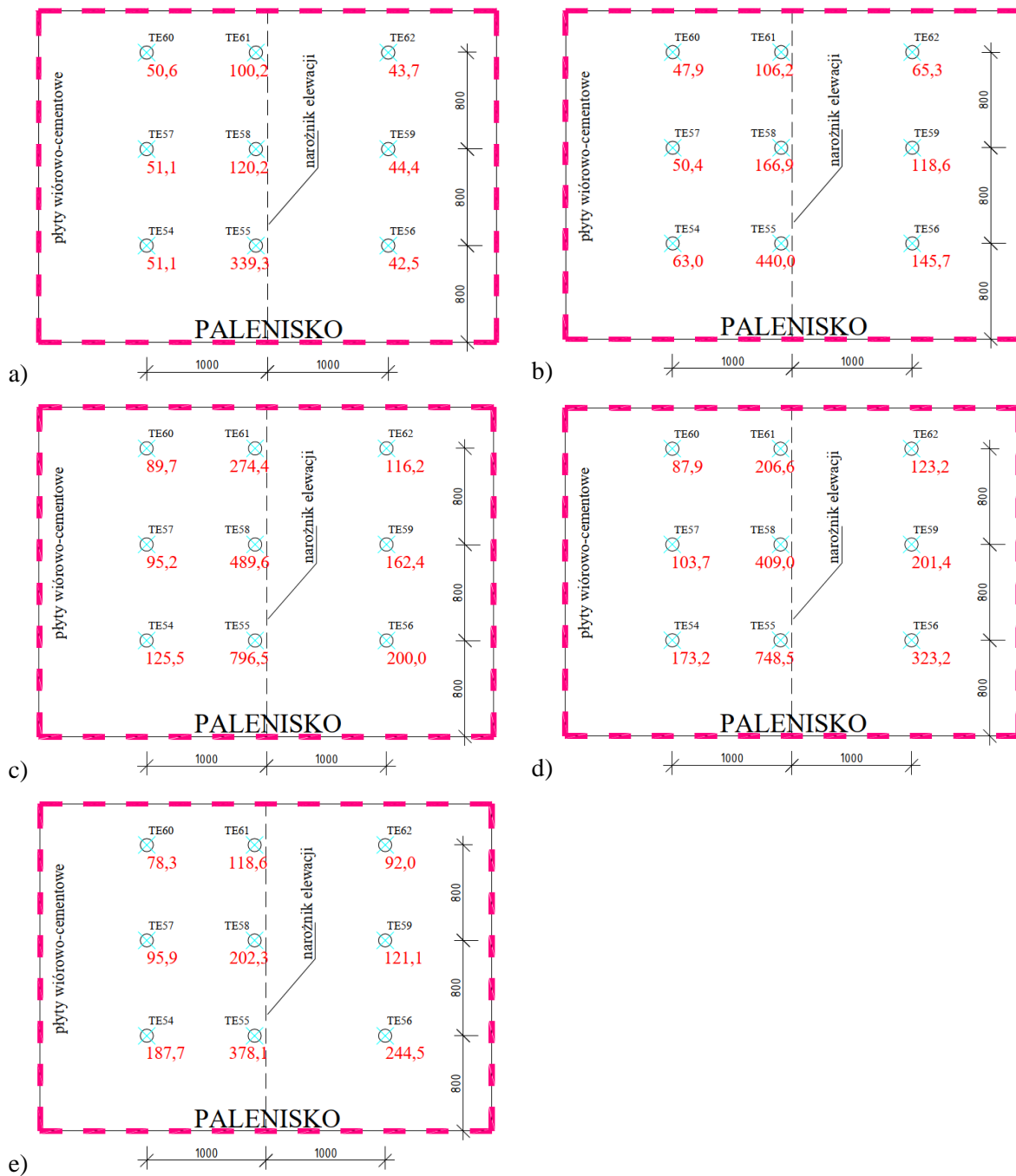
W przeciwieństwie do badań na modelach rzeczywistych nie opracowano globalnych map temperatur dla elewacji budynku modelowego. W przypadku dwóch serii badań jako okładziny zewnętrzne występowały materiały palne - płyty wiórowo-cementowe. W serii F elewacja wykonana była częściowo z płyt włóknisto-cementowych oraz płyt wiórowo-cementowych, a w serii G – w całości wykonana z płyt wiórowo-cementowych.

Badania te wykonano celem wskazania różnic w badaniu modelu rzeczywistego elewacji w stosunku do badania elewacji na budynku modelowym.





**Rys. 5.48.** Mapy temperatur dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań F: a) w 1'00"; b) w 5'00"; c) w 10'00"; d) w 20'00"; e) w 40'00"; f) w 60'00"



**Rys. 5.49.** Mapy temperatur dla termopar umieszczonych na powierzchni okładziny zewnętrznej dla serii badań G: a) w 1'00"; b) w 5'00"; c) w 10'00"; d) w 20'00"; e) w 40'00"; f) w 60'00"

### 5.1.16 Porównanie badań wielkoskalowych

Badania wielkoskalowe są niewątpliwie najlepszym sposobem badania elewacji, w tym elewacji wentylowanych. Przedstawiają one bardzo dobrze zjawiska, które mogą występować w pożarze budynku. Możliwe są dwa scenariusze rozwoju pożaru: oddziaływanie płomieniami przez otwór z pomieszczenia na elewację lub pożar występujący w znacznej bliskości elewacji na zewnątrz. Na podstawie powyższych badań zauważalne są znaczne różnice pomiędzy badaniami na modelach

rzeczywistych elewacji i elewacją na budynku modelowym. W przypadku tych pierwszych zapewnione są laboratoryjne warunki, a w przypadku budynków modelowych występuje wpływ środowiska zewnętrznego, tj. wiatr i inne zjawiska atmosferyczne.

W przypadku badania elewacji na budynku modelowym wpływ wiatru na serie F był istotny. Temperatury, które występowały na elewacji w serii F nie powinny być krytyczne dla matrycy cementowej płyt włóknisto-cementowych. Osiągnano maksymalnie temperaturę około 390°C, gdzie dla serii G było to już około 810°C. Wyniki maksymalnych temperatur odczytanych przez termopary dla serii badań G były zbliżone do badań na modelach rzeczywistych, lecz skala ich oddziaływania była znacznie mniejsza - z uwagi na czas trwania badania. Model rzeczywisty z nadmuchem laminarnym przywołuje najbardziej niekorzystną sytuację w warunkach pożaru – wydobywanie się płomieni z otworu okiennego. Do czasu zniszczenia glifu płomienie mogą dostawać się wewnątrz pustki powietrznej wyłącznie przez szczeliny wentylacyjne w okolicy okien. Zniszczenie glifu umożliwia płomieniom bezpośredni dostęp do przestrzeni wentylacyjnej. Rozwój pożaru wewnątrz przestrzeni wentylacyjnej przyspiesza postępujące zniszczenie okładziny elewacyjnej jak i wszystkich elementów systemu elewacji wentylowanej.

Na potrzeby oceny elewacji nie ma potrzeby wykonywania próbných badań na budynkach modelowych, wystarczającym badaniem są modele rzeczywiste – które to w większości przypadków będą najbardziej niekorzystnym wariantem rozwoju pożaru.

## **5.2 Analiza destrukcji płyt włóknisto-cementowych podczas oddziaływania pożaru**

Do dalszej analizy płyt włóknisto-cementowych przygotowano próbki referencyjne oraz pozyskano próbki poddanie oddziaływaniu pożarem w badaniach na modelach wielkoskalowych.

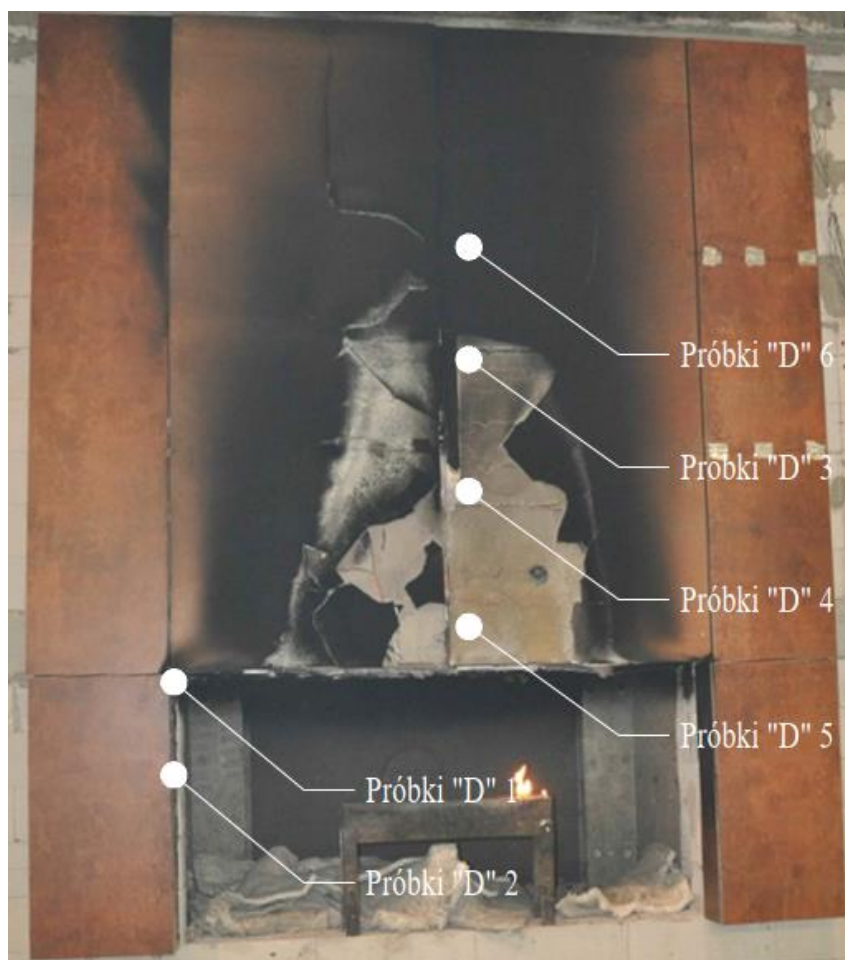
Następnie próbki płyt włóknisto-cementowych poddano badaniom wytrzymałościowym i optycznym. Analizie poddano serie badań D, J i F. Serie D i J wykonane były z płyt włóknisto-cementowych tego samego producenta, lecz serie te różniły się producentami podkonstrukcji, sposobem podziału płyt oraz wykonaniem glifów. W serii badań F zastosowano płyty włóknisto-cementowe innego producenta, ponadto seria ta dotyczyła badania rozwoju pożaru na elewacji budynku modelowego.

Następnie opisano sposób zniszczenia płyt włóknisto-cementowych w zakresie fazy matrycy cementowej i fazy rozproszonej w oddziaływaniu pożarem na modelach wielkoskalowych.

### **5.2.1 Seria badań D**

Seria badań D odnosi się do badania wielkoskalowego na modelu rzeczywistym elewacji, które trwało 60 minut. Po badaniu pozyskano próbki z poddanej oddziaływaniu pożarem okładziny

elewacyjnej w 6 lokalizacjach, w tym 5, które odpadły z modelu podczas badania. Próbki pobrano z lokalizacji przedstawionych na rysunku 5.50.

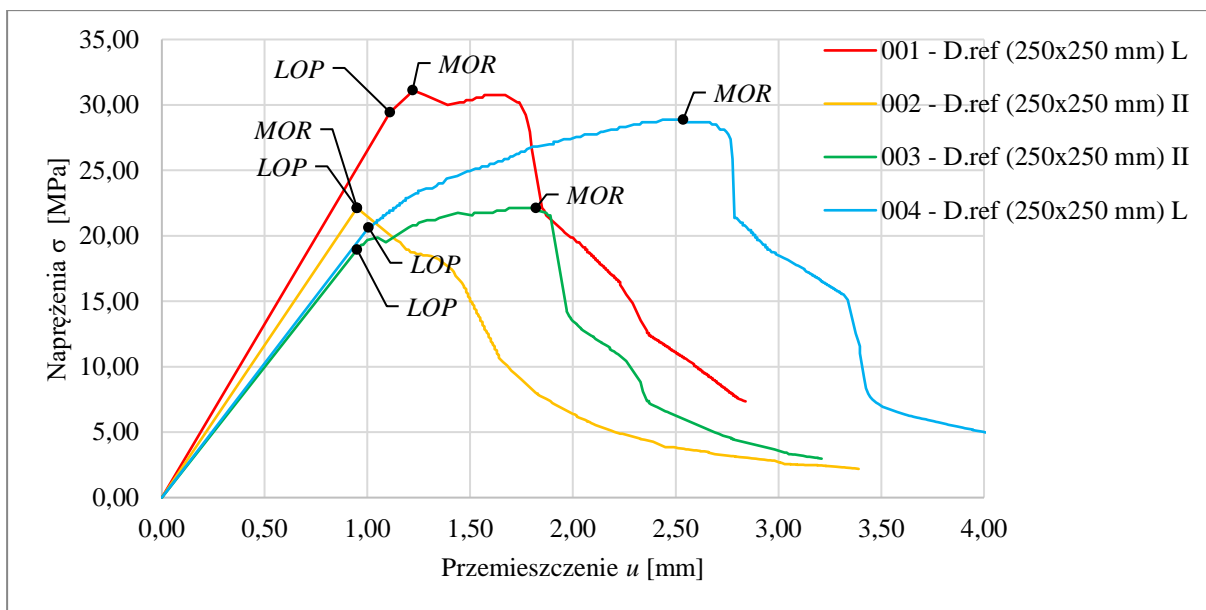


**Rys. 5.50.** Lokalizacja pobranych próbek dla serii badań D

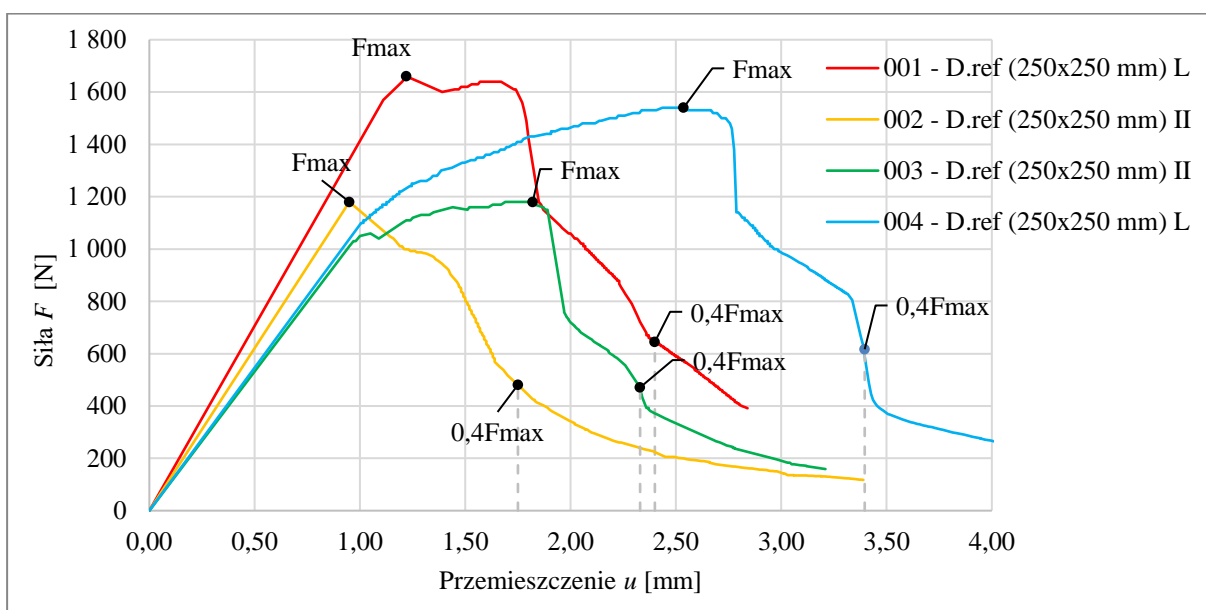
Seria D została zweryfikowana następującymi metodami badawczymi:

- badanie wytrzymałości na zginanie  $MOR$  wg PN-EN 12467 zgodnie z pkt. 4.4;
- analiza powierzchni z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego zgodnie z pkt. 4.5;
- analiza struktury z wykorzystaniem SEM zgodnie z pkt. 4.6;
- analiza wizualna próbek.

W pierwszym kroku analizie poddano próbki referencyjne. Próbki te charakteryzowały się dużą wytrzymałością na zginanie  $MOR$  – przebieg wytrzymałości na zginanie i granicę proporcjonalności przedstawiono na wykresie 5.27. Maksymalną wartość siły ( $F_{max}$ ) i wartość  $0,4 F_{max}$  potrzebną do wyznaczenia energii pochłoniętej podczas próby zginania określanej jako praca łamania  $W_f$  przedstawiono na wykresie 5.28.



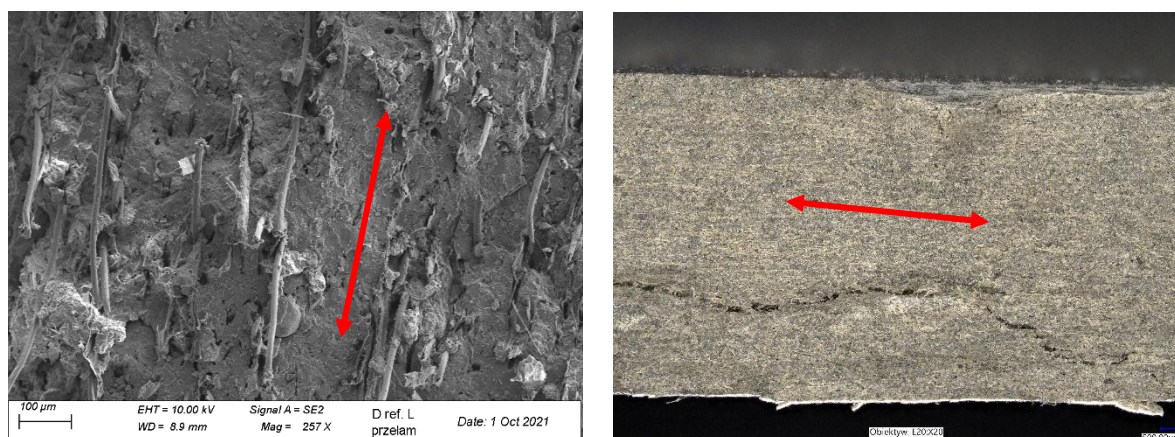
**Wykres 5.27.** Wyniki wytrzymałości na zginanie *MOR* próbek referencyjnych D. ref o wymiarach 250 × 250 mm



**Wykres 5.28.** Wskazanie parametrów koniecznych do obliczenia praca łamania  $W_f$  dla próbek referencyjnych D. ref o wymiarach 250 × 250 mm

Zestawienie parametrów charakterystycznych dla próbek referencyjnych D.ref o wymiarach 250 × 250 mm przedstawiono w tabeli 5.1. Zauważalne jest, iż kierunek „prasowania”, który powoduje główny kierunek rozkładu włókien (przykład przedstawiono na rysunku 5.51) w znaczący sposób wpływa na parametry wytrzymałościowe. Należy wskazać, iż kierunek równoległy (kierunek, w którym płyty włóknisto-cementowe mają większy wymiar), wykazuje parametry większe nawet o 50% w stosunku do drugiego kierunku – prostopadłego. Wobec tego zdecydowano się na wykonywanie

pomiarów określenia wytrzymałości na zginanie *MOR* w kierunku równoległym (o ile próbka umożliwia badanie w tym kierunku).

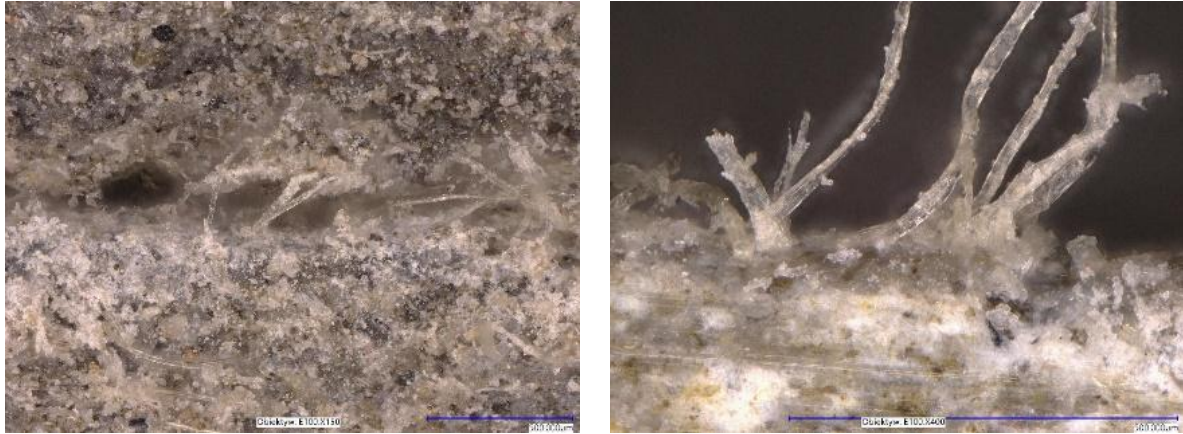


**Rys. 5.51.** Kierunek rozkładu włókien dla przykładowych próbek referencyjnych D.ref.

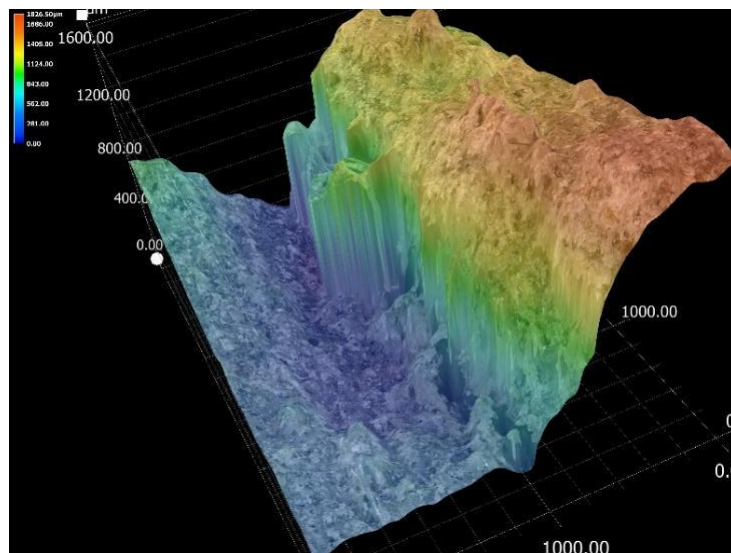
**Tabela 5.1.** Parametry charakterystyczne wyznaczone dla próbek referencyjnych D.ref o wymiarach  $250 \times 250$  mm

Oznaczenie Próbkki	<i>MOR</i>	<i>LOP</i>	<i>E<sub>D</sub></i>	<i>W<sub>f</sub></i>
	MPa	MPa	GPa	$1 / \int_{F_0}^{0,4F_{max}} F dx$
001 - D.ref (250x250 mm) L	31,13	29,44	22,10	1284,4
002 - D.ref (250x250 mm) II	22,13	22,13	19,41	636,3
003 - D.ref (250x250 mm) II	22,13	18,94	16,61	920,4
004 - D.ref (250x250 mm) L	28,88	20,63	17,08	1811,6

Badanie struktury powierzchni przelamów próbki wykonano z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego i przedstawiono na rysunku 5.52. Widoczne są tam zagłębienia i wyrwy spowodowane niejednorodną strukturą kompozytu. Widoczne wyrwy w większości powstają po włóknach. Topografię powierzchni przelamu próbek z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego przedstawiono na rysunku 5.53. Topografia i widok przelamu wskazują zniszczenia tj. wyciągnięcie włókna i powstające przez to wyrwy bądź zerwanie włókna. Nie występuje zniszczenie poprzez wyciągnięcie włókna z częściowo przyczepioną do niego matrycą, co wskazuje, iż matryca ma bardzo zwartą i wytrzymałą strukturę oraz charakteryzuje się dużą „spoistością”.

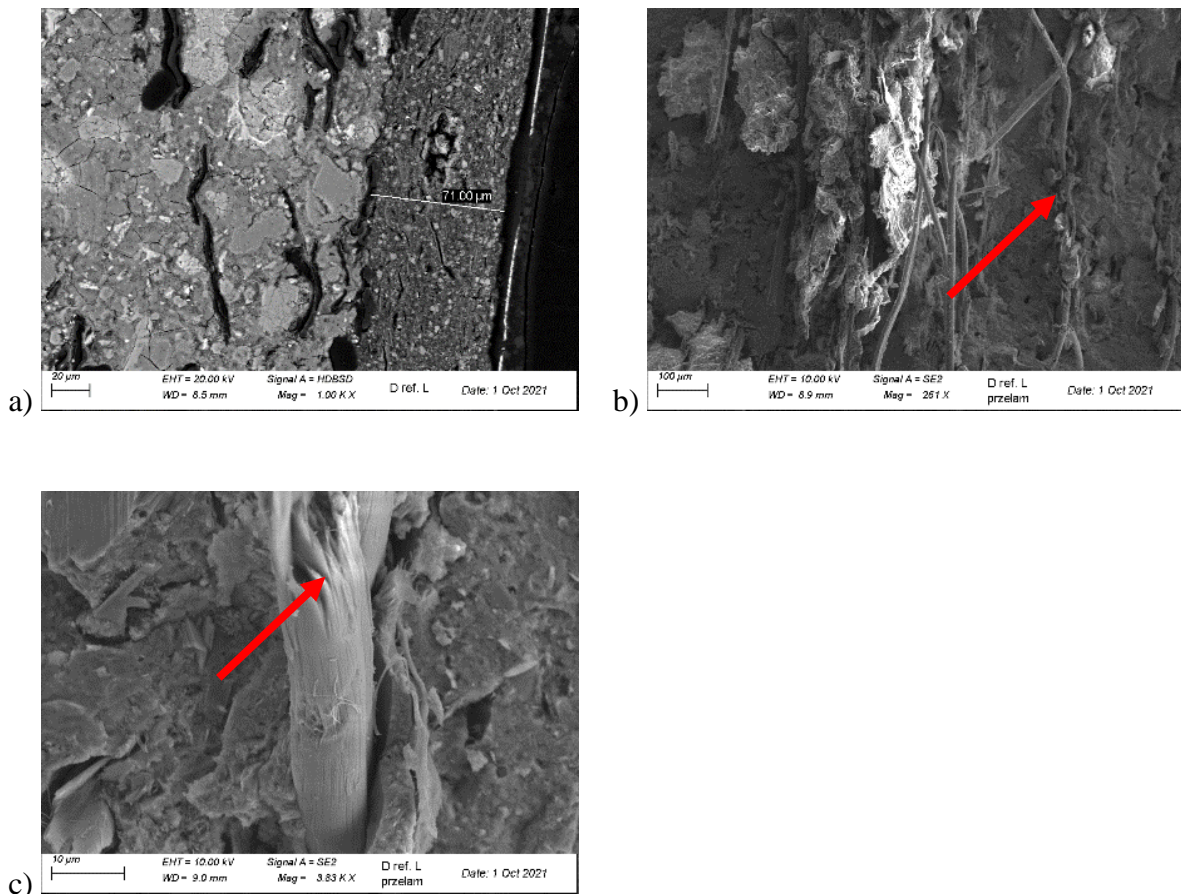


**Rys. 5.52.** Widok przełamu próbki o oznaczeniu D. ref z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego



**Rys. 5.53.** Widok przełamu próbki w zakresie topografii powierzchni o oznaczeniu D. ref z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego

Przy wykorzystaniu mikroskopu skaningowego przeanalizowano warstwę przypowierzchniową i warstwy przekrojowe próbki referencyjnej. Na rysunku 5.54 przedstawiono zniszczenie włókien w płytach włóknisto-cementowych poprzez wyrwanie z powstającą wyrwą lub wyciągnięcie całego włókna (na rysunku 5.54 b)) i zerwanie włókna (na rysunku 5.54 c)). Zniszczenie próbki referencyjnej zazwyczaj powstaje przez kombinację tych dwóch efektów: zerwanie włókna, oraz wyciągnięcie włókna z wyrwy spowodowanej niską przyczepnością włókien do matrycy cementowej.

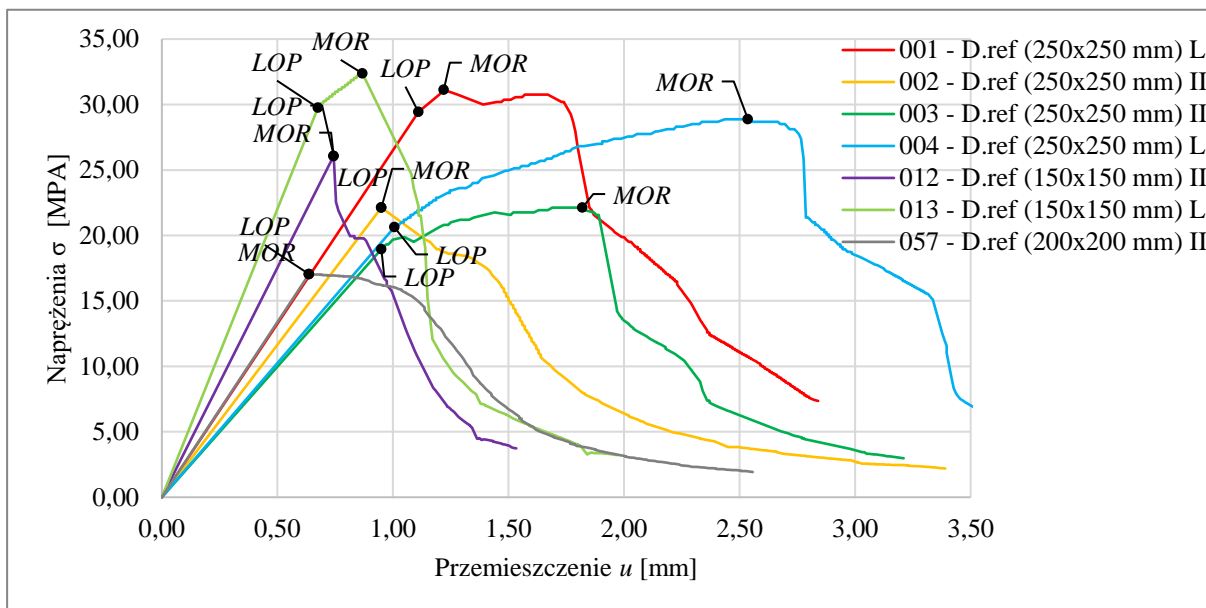


**Rys. 5.54.** Widok przełamu próbki o oznaczeniu D. ref z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego:  
a) warstwa przypowierzchniowa; b) wyrwa po wyciągnięciu włókien; c) zerwanie włókna

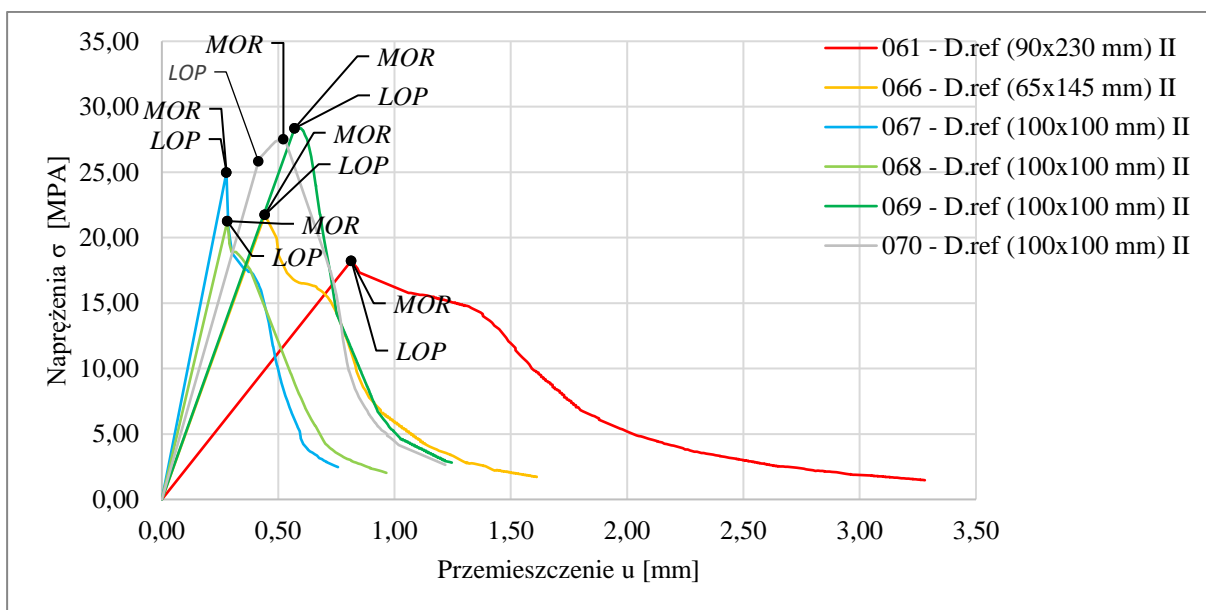
Wyniki wytrzymałości na zginanie *MOR* dla próbek referencyjnych przedstawiono na wykresach: 5.29 i 5.30. Pomimo iż norma [58] dopuszcza dowolny rozmiar próbki (zalecany jest  $250 \times 250$  mm), to kształt strefy po osiągnięciu maksymalnej wytrzymałości na zginanie *MOR* wygląda inaczej w przypadku próbek o mniejszych wymiarach. Dodatkowo próbki o mniejszych gabarytach w większości przypadków charakteryzują się „spiczastym” punktem wielokrotnie wskazującym jednocześnie granicę proporcjonalności *LOP* i wytrzymałości na zginanie *MOR*. W próbkach o większych gabarytach tj.  $250 \times 250$  mm granica proporcjonalności *LOP* i wytrzymałości na zginanie *MOR* nie są oznaczone w tym samym punkcie na wykresach.

Zestawienie parametrów charakterystycznych próbek referencyjnych tj. wytrzymałość na zginanie *MOR*, granice proporcjonalności *LOP*, moduł sprężystości  $E_D$ , prace łamania  $W_f$  przedstawiono w tabeli 5.2.





**Wykres 5.29.** Przebieg badania wytrzymałości na zginanie zgodnie z pkt. 4.4 dla próbek referencyjnych D. ref o różnych wymiarach – cz. 1.



**Wykres 5.30.** Przebieg badania wytrzymałości na zginanie zgodnie z pkt. 4.4 dla próbek referencyjnych D. ref o różnych wymiarach – cz. 2.

**Tabela 5.2.** Parametry charakterystyczne wyznaczone dla próbek referencyjnych D. ref.

Oznaczenie Próbkki	<i>MOR</i>	<i>LOP</i>	<i>E<sub>D</sub></i>	<i>W<sub>f</sub></i>
	MPa	MPa	GPa	$1 / \int_{F_0}^{0,4F_{max}} F dx$
001 - D.ref (250x250 mm) L	31,13	29,44	22,10	1284,4
002 - D.ref (250x250 mm) II	22,13	22,13	19,41	636,3
003 - D.ref (250x250 mm) II	22,13	18,94	16,61	920,4
004 - D.ref (250x250 mm) L	28,88	20,63	17,08	1811,6
012 - D.ref (150x150 mm) II	26,08	26,08	9,16	793,1
013 - D.ref (150x150 mm) L	32,38	29,75	11,50	1135,8
057 - D.ref (200x200 mm) II	17,04	17,04	14,27	225,6
061 - D.ref (90x230 mm) II	18,23	18,23	18,64	76,1
066 - D.ref (65x145 mm) II	21,74	21,74	12,84	408,3
067 - D.ref (100x100 mm) II	24,98	24,98	9,69	756,3
068 - D.ref (100x100 mm) II	21,26	21,26	8,16	652,5
069 - D.ref (100x100 mm) II	28,35	28,35	5,37	841,3
070 - D.ref (100x100 mm) II	27,51	25,82	6,71	782,5

Następnie poddano analizie materiały pobrane z okładziny zewnętrznej modelu rzeczywistego elewacji poddanej oddziaływaniu pożarem. Próbkki pobrane bezpośrednio nad komorą spalania wykazywały całkowite wyczerpanie nośności. Element, które odpadł w pierwszej kolejności w strefie najbliższej paleniska – D5 (lokalizacja zgodnie z rysunkiem 5.50), przedstawiono na rysunku 5.55. Element ten charakteryzuje się znaczną delaminacją i zniszczeniem powierzchniowym. Ponadto, widoczne są na nim spękania. Z elementu przygotowano próbkę, którą poddano dalszym badaniom.

Materiały pobrane z modelu wielkoskalowego w formie próbek poddano sprawdzeniu z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego. Materiał o oznaczeniu D5 odpadł w 13'30" minucie badania. Maksymalna temperatura oddziałująca na próbkę została zinterpolowana i mieściła się w przedziale temperatur 720 – 750°C. Włókna i matryca cementowa po takim czasie oddziaływania tak wysokimi temperaturami nie wykazują żadnych właściwości w zakresie nośności i ewentualnej powtórnej przydatności materiału. Widoczne są rozwarstwienia (delaminacja) analizowanej płyty, kryształki mikrokrzemionki utrzymują płytę w strukturze „zwartej”. Nastąpiła całkowita piroliza włókien. Widoki badania z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego przedstawiono na rysunku 5.56.

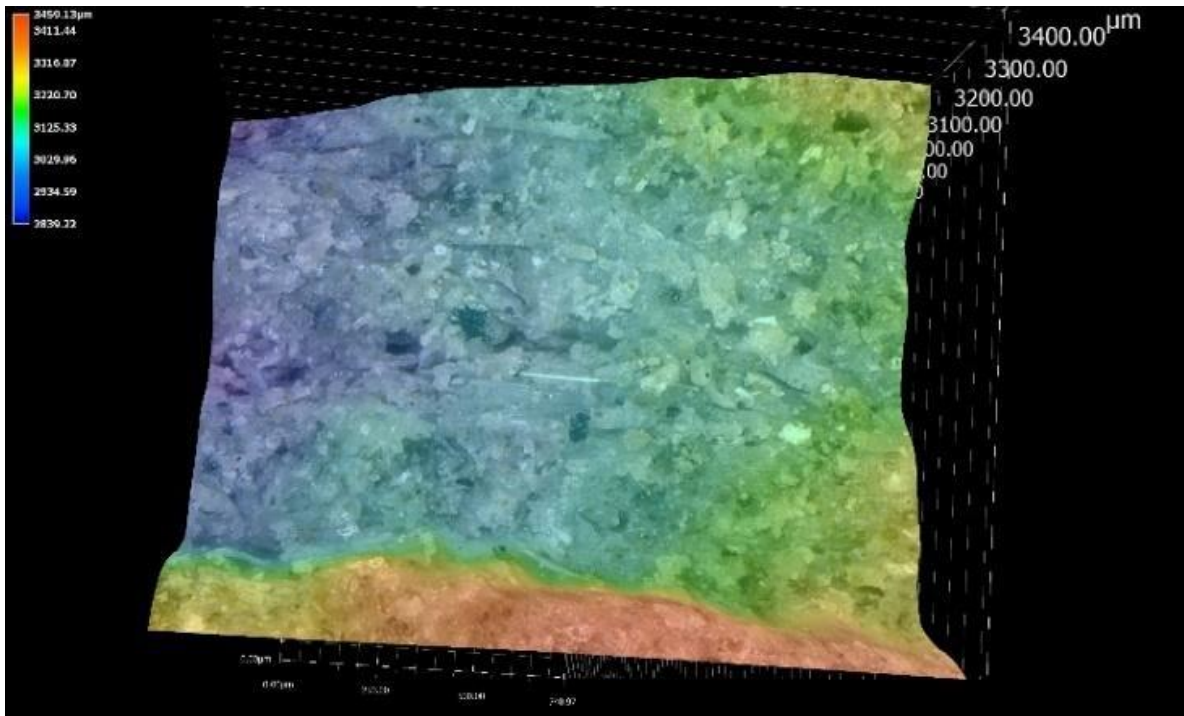


**Rys. 5.55.** Widok element D5, która spadła z modelu wielkoskalowego podczas badania



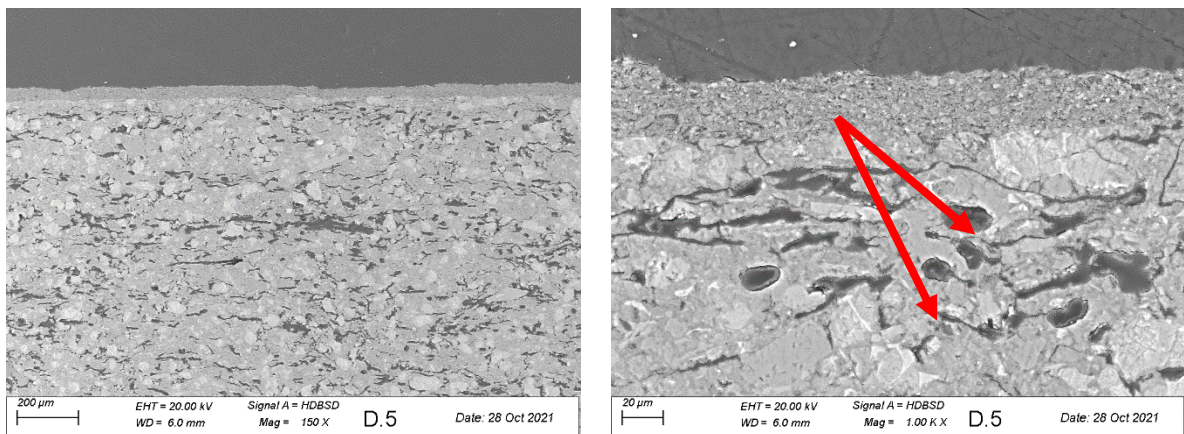
**Rys. 5.56.** Przekrój próbki D5 z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego

Próbka podczas badania wytrzymałości na zginanie *MOR* ulega zniszczeniu przez wysokoenergetyczne złamanie. Oznacza to, że złamanie nastąpiło po tzw. „najkrótszej drodze”. Płyta jest bardzo krucha i ma bardzo niską wytrzymałość na zginanie *MOR* – nie posiada włókien, które „scalają” materiał. Przekrój płaszczyzny w zakresie topografii przeanalizowano z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego przedstawiając go na rysunku 5.57. Wskazywał on na proste złamanie bez wyrw. Brak widocznych włókien.

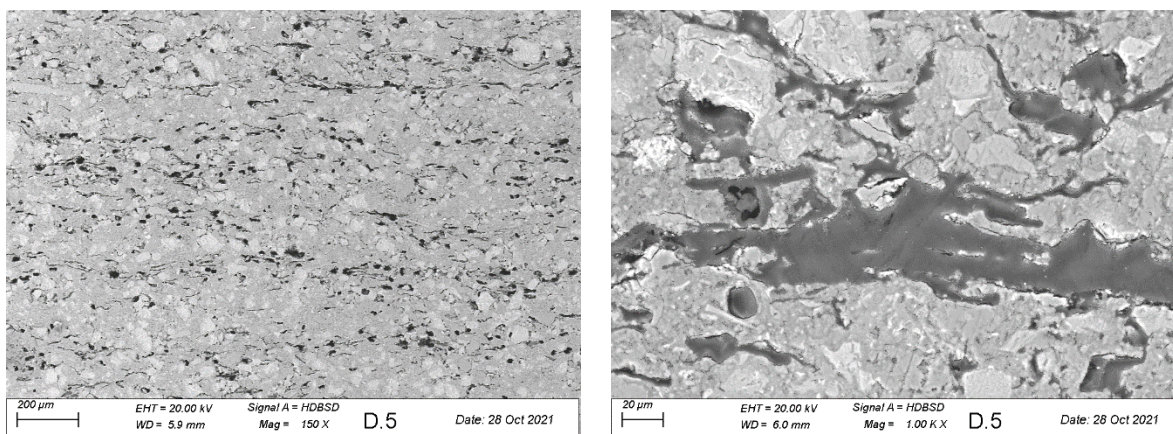


**Rys. 5.57.** Przekład próbki D5 z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego w zakresie topografii

Kolejno przeanalizowano zglądy próbki D5 w części przypowierzchniowej (rysunek 5.59) i w środku przekroju próbki (rysunek 5.60). W obu tych lokalizacjach znajdowało się wiele wyrw, które są pozostałością po pyrolizie włókien i szereg spękań, które wskazują na całkowite zniszczenie matrycy cementowej. Lokalizacja 400 mm powyżej krawędzi komory spalania jest krytyczna dla tego kompozytu.

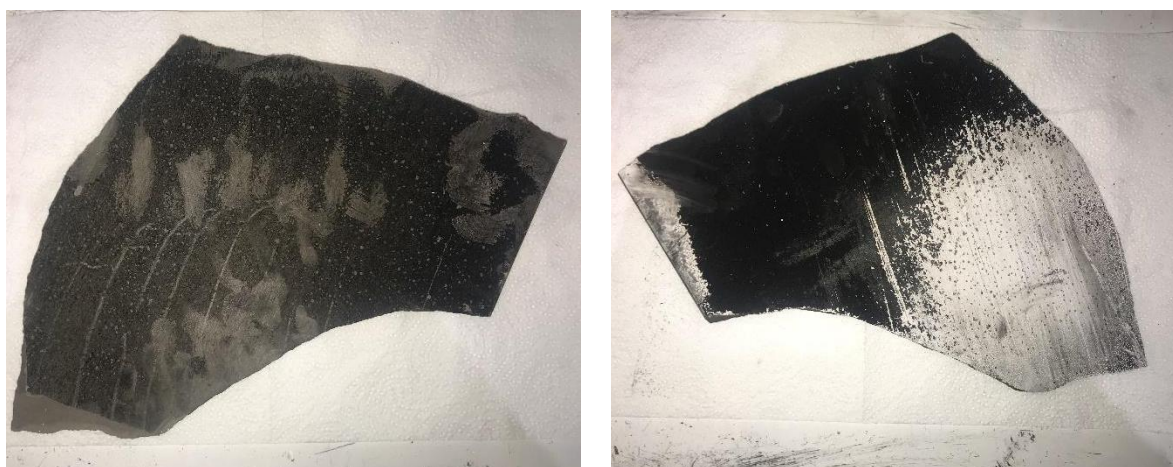


**Rys. 5.58.** Zgląd próbki D5 wykonany z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego – strefa przypowierzchniowa

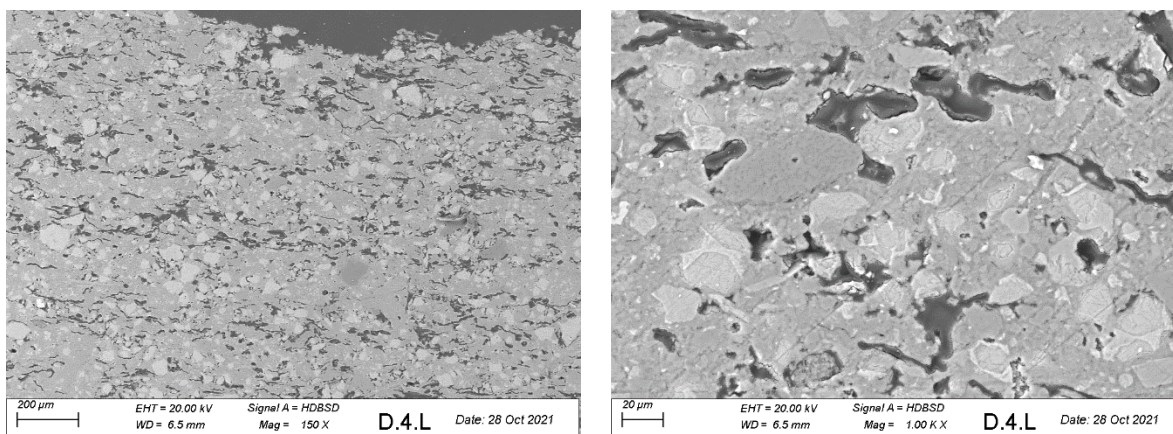


**Rys. 5.59.** Zgląd próbki D5 wykonany z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego – strefa w środku przekroju

Następnie wykonano analizę elementu o oznaczeniu D4 odpowiadającego lokalizacji przedstawionej na rysunku 5.50. Element ten odpadł z modelu rzeczywistego w 17'25" minucie, a następnie z niego została przygotowana próbka. Przełam próbki charakteryzował się prostymi krawędziami łamania, charakterystycznymi dla materiału ściętego. Próbka D4 na modelu rzeczywistym zlokalizowana była około 700 mm nad glifem górnym ponad komorą spalania, co odpowiada lokalizacji termopary TE3. Najwyższa zarejestrowana temperatura na tej termoparze w czasie pierwszych 17'00" minut to 473°C, tak jak przedstawiono to na wykresie 5.11. Całka funkcji dla termopary TE3 do czasu odpadnięcia elementu wynosiła około  $3,8e5$  [s·°C]. Element, który odpadł z modelu rzeczywistego, był mocno „osmolony” na powierzchni i rozwarstwiony. Widok całego elementu przedstawiono na rysunkach 5.60. Analizę próbki z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego przedstawiono na rysunku 5.61. Próbka charakteryzuje się brakiem włókien przy tym wykazując strukturę bardziej zwartą aniżeli próbka D5. W próbce występuje również znacznie mniej spękań matrycy cementowej.



**Rys. 5.60.** Widok elementu, który spadł z modelu podczas badania o oznaczeniu D4



**Rys. 5.61.** Zgląd próbki D4 wykonany z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego – strefa przypowierzchniowa

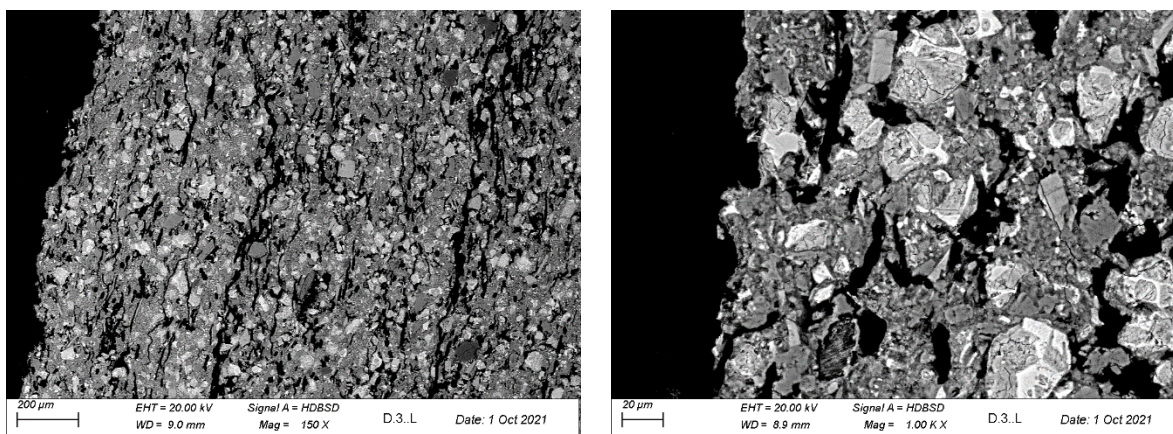
Próbka D3 pochodzi z elementu, który odpadł w czasie około 34'00" minuty z wysokości około 1200 mm nad glifem górnym, nad komorą spalania. Próbka D3 charakteryzuje się większą zwartością struktury (w ocenie wizualnej) aniżeli próbki pobrane w lokalizacji D4 i D5. Celem określenia całki funkcji temperatury i czasu, który działa na próbkę, dokonano interpolacji wyników pomiędzy termoparami TE3 i TE7, której to wartość wynosi około  $6,7e5$  [s·°C]. Maksymalna temperatura oddziałująca na próbkę to około 400°C. Kształt elementu, który odpadł przedstawiono na rysunku 5.62.



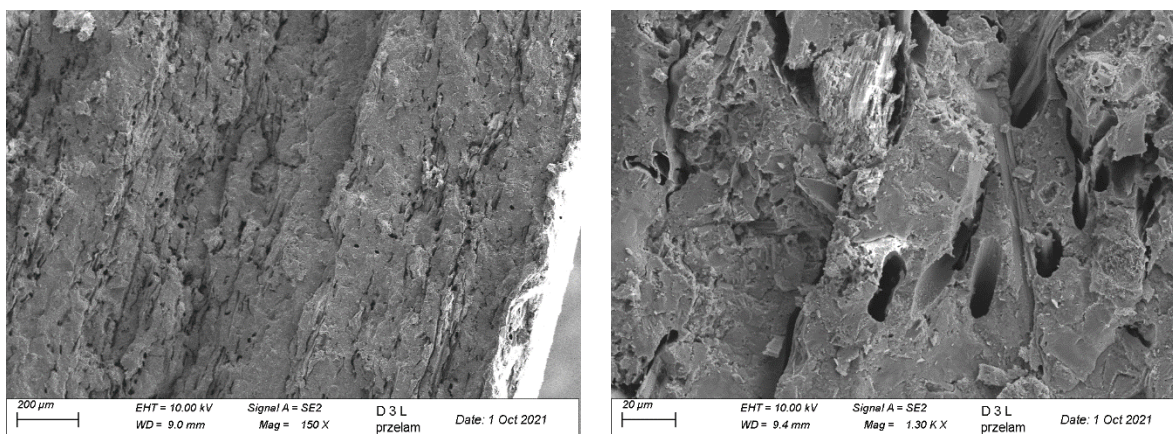
**Rys. 5.62.** Widok elementu, który odpadł z modelu podczas badania o oznaczeniu D3

Zgląd próbki D3 przeanalizowano z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego. Zaobserwowano tam znaczne zniszczenia próbki i brak włókien, co przedstawiono na rysunku 5.64. Widoczna jest też tam znaczna krystalizacja struktury.

Przełam próbki D3 po badaniu z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego przedstawiono na rysunku 5.64. Widoczne są otwory po włóknach, które to uległy całkowitemu zniszczeniu – pirolizie.



**Rys. 5.63.** Zgląd próbki D3 wykonany z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego – strefa przypowierzchniowa



**Rys. 5.64.** Przelam próbki D3 wykonany z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego

Próbkę o oznaczeniu D6 pobrano z elementu, który odpadł z modelu serii D. Temperatura oddziałująca na niego była niższa niż w przypadku wcześniejszych próbek, lecz pomimo to próbka ta wykazywała duże rozwarstwienia, przy jednoczesnym osmoleniu. Widok elementu, który odpadł z modelu oraz z którego wykonano próbkę D6 przedstawiono na rysunku 5.65. W zakresie oceny wizualnej próbka D6 charakteryzuje się bardziej stabilną i zwartą strukturą aniżeli próbki pobrane z niższych partii modelu rzeczywistego.

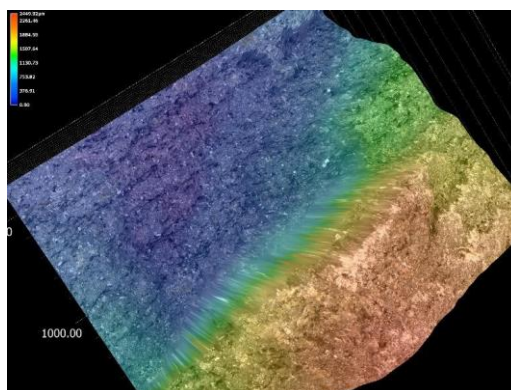


**Rys. 5.65.** Widok elementu, który odpadł z modelu podczas badania o oznaczeniu D6

Próbkę D6 po badaniu wytrzymałości na zginanie *MOR* przeanalizowano z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego. Na rysunku 5.66 przedstawiono przełam, a na rysunku 5.67 topologię przełamu. Przełam, tak samo jak w przypadkach próbek pobranych z lokalizacji bliżej paleniska, wykazuje prostą krawędź łamania. Wskazuje to na całkowitą pirolizę i niską wytrzymałość na zginanie *MOR* próbki.



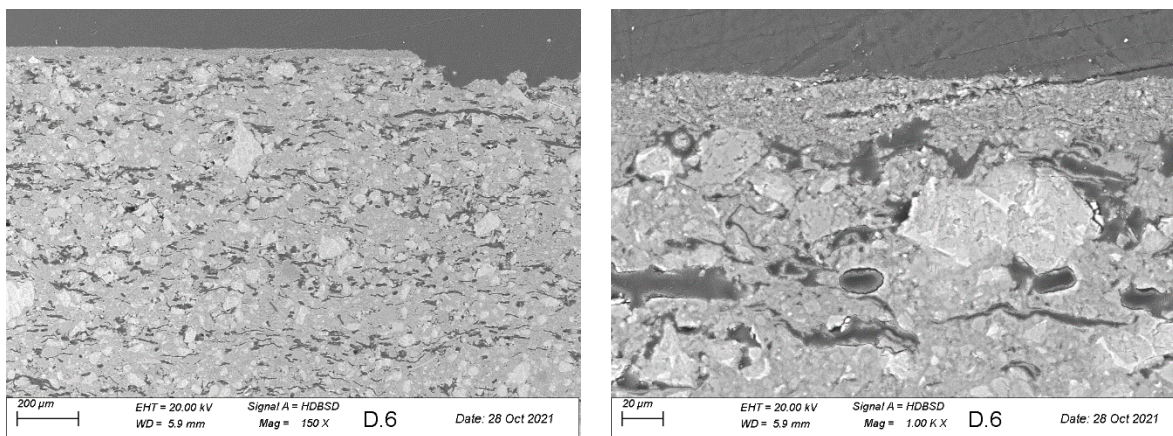
**Rys. 5.66.** Widok próbki D6 z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego



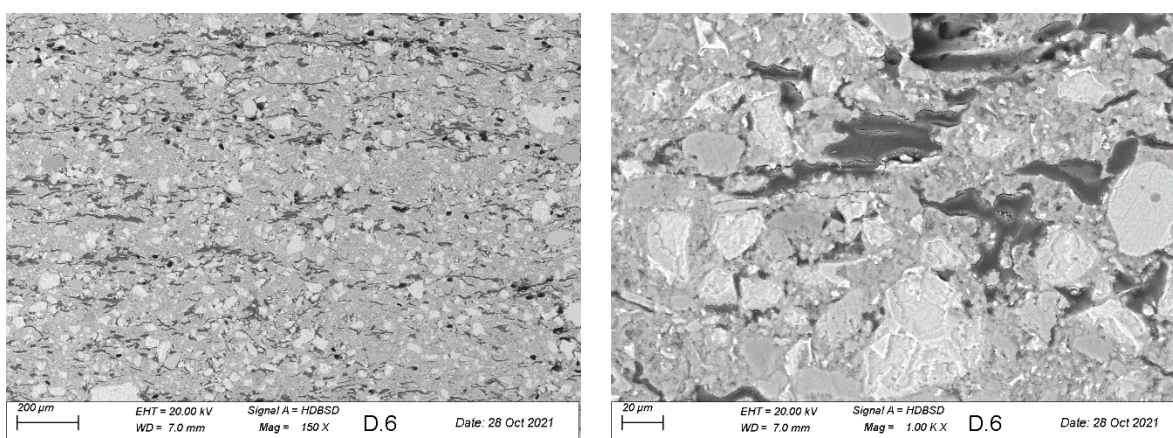
**Rys. 5.67.** Widok próbki D6 z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego w zakresie topografii



Widok zglądu próbki D6 z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego przedstawiono na rysunku 5.68 – dla strefy przypowierzchniowej oraz na rysunku 5.69 – dla strefy w środku przekroju. Strefa przypowierzchniowa i strefa w środku przekroju prezentują się podobnie, tzn. włókna nie są zauważalne. Oznacza to całkowitą pirolizę, którą spowodowały temperatury – powyżej 300°C.



**Rys. 5.68.** Przełam próbki D6 wykonany z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego – strefa przypowierzchniowa



**Rys. 5.69.** Przełam próbki D6 z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego – strefa w środku przekroju

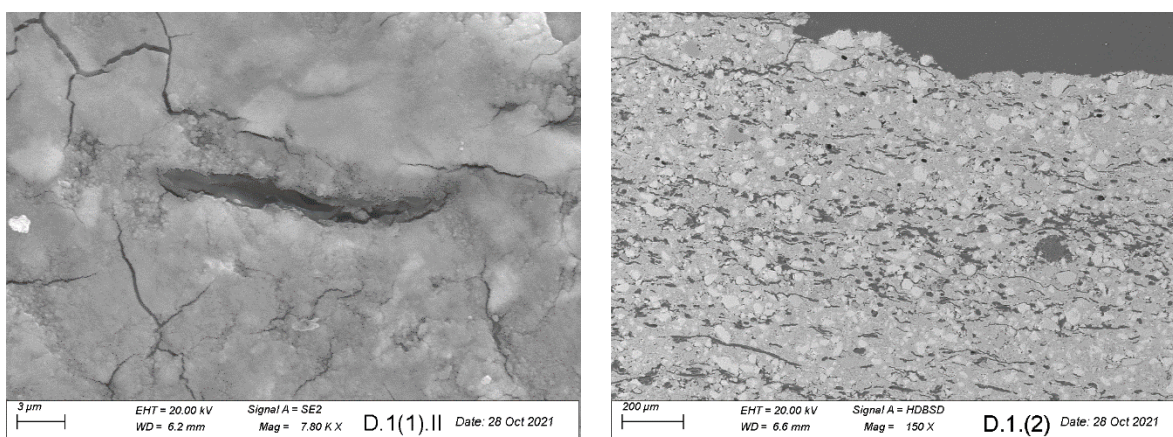
Kolejnym elementem, z którego pobrano próbkę, a który odpadł z modelu rzeczywistego elewacji był gład umiejscowiony po lewej stronie (lokalizacje przedstawiono na rysunku 5.50) Płyta w tym miejscu nie wyczerpała swojej nośności, lecz zawiódł adhezyjny sposób mocowania. Element, który odpadł z modelu, przedstawiono na rysunku 5.70. Wykazuje on znaczne osmolenie od gładu górnego, widoczne jest również złuszczenie się lakieru (oznaczone czerwonym okręgiem).



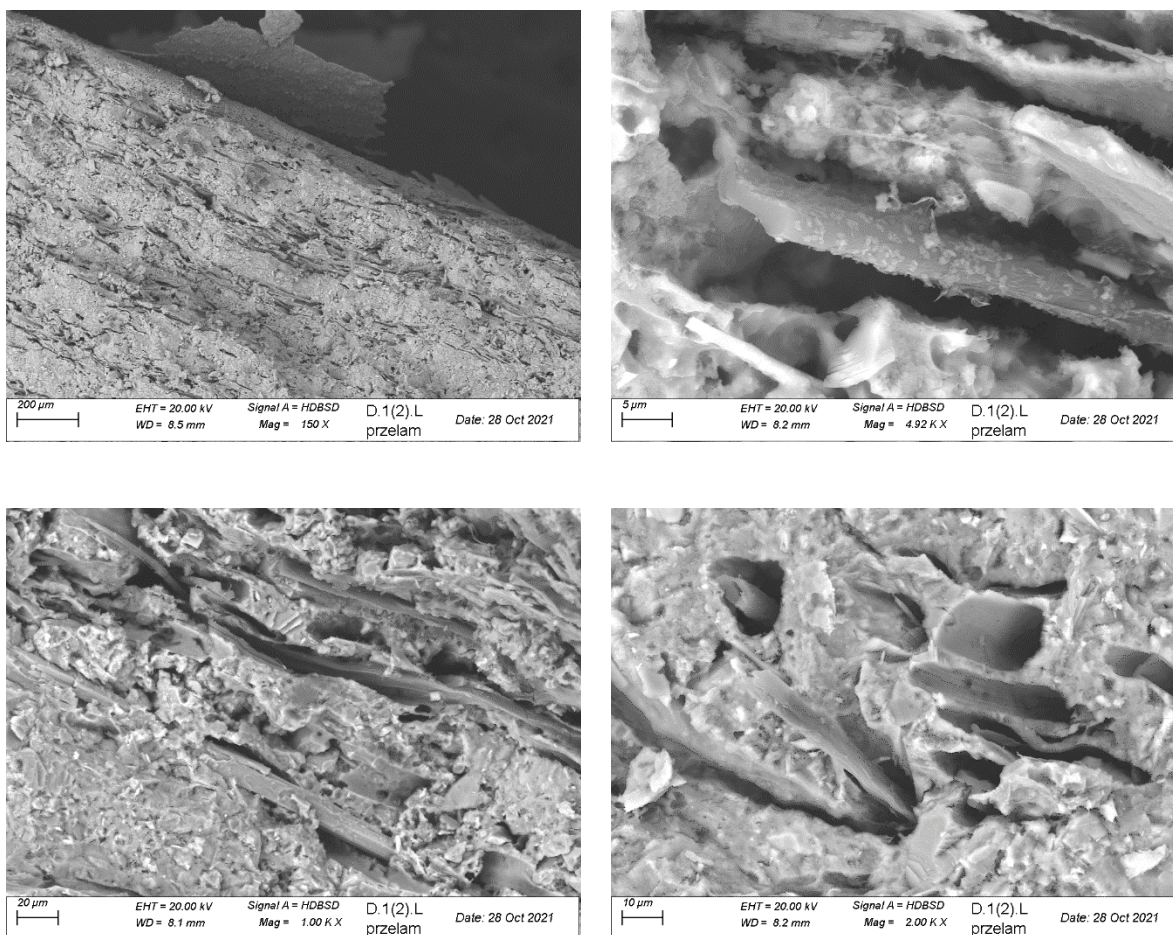
**Rys. 5.70.** Widok elementu, który spadł z modelu podczas badania o oznaczeniu D1/D2

Na rysunku 5.71 przedstawiono zgląd próbki D1 pobrany z górnej części elementu glifu boczny, który odpadł w trakcie badania. Wykazuje on zwartą strukturę oraz małą ilość spękań.

Przekrój próbki D1 przedstawiono na rysunku 5.72. Wykazuje on strukturę matrycy z minimalnymi zniszczeniami – widoczne są spękania, ponadto zauważyć można również częściowo zachowane włókna. Temperatura panująca w tej strefie modelu nie jest krytyczna dla płyt włóknisto-cementowych w zakresie całkowitej destrukcji włókien, tzn. nie uległy one pirolizie.



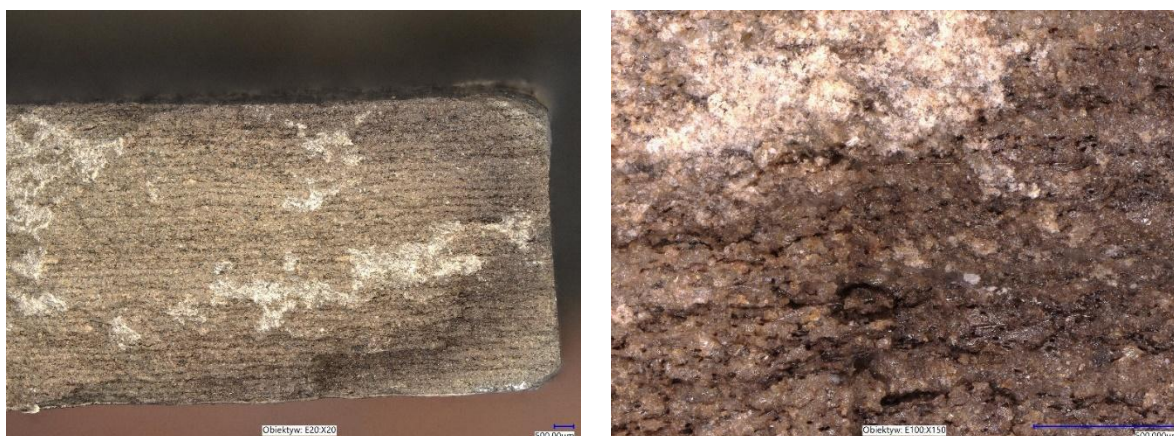
**Rys. 5.71.** Zgląd próbki D1 z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego



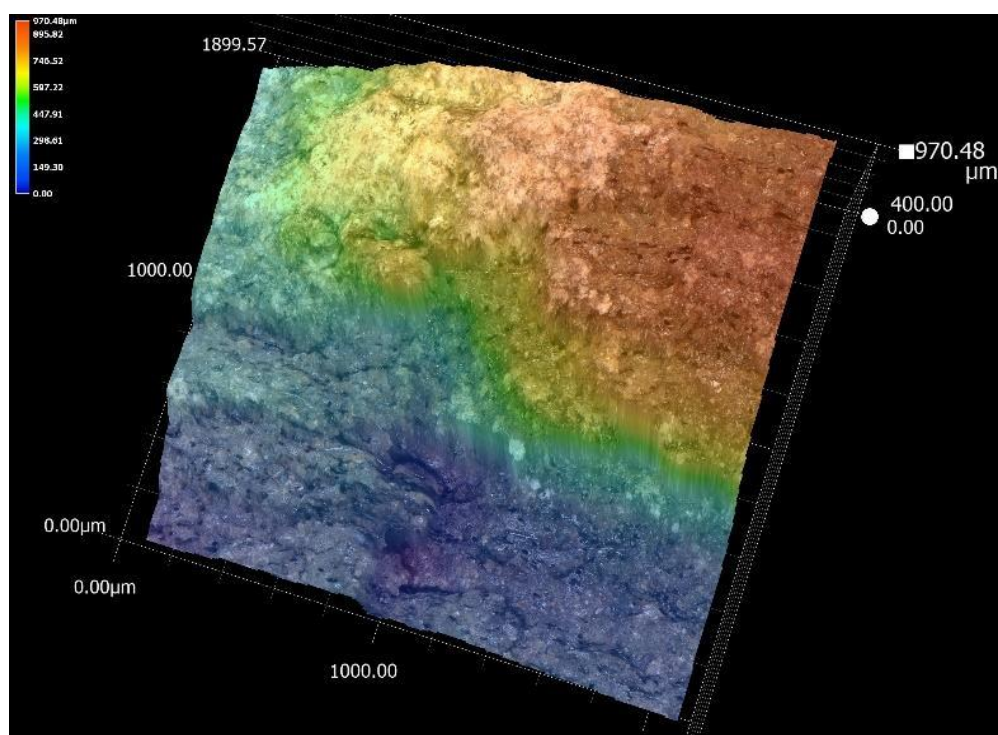
**Rys. 5.72.** Przekrój próbki D1 z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego

Kolejno wykonano badania próbki o oznaczeniu D2 pozyskanej z tego samego elementu, co próbka D1 (oznaczona na rysunku 5.70), lecz w lokalizacji niższej - dokładne miejsce pobrania przedstawiono na rysunku 5.50. Lokalizacja ta była mniej narażona na działanie wysokimi temperaturami. Widok przełamu próbki o oznaczeni D2 z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego przedstawiono na rysunku 5.73. Widoczna próbka wykazuje już oznaki krystalizacji, co oznacza, iż nawet taka temperatura powoduje nieodwracalne zmiany strukturalne w matrycy płyt włóknisto-cementowych.

Na rysunku 5.74 przy badaniu topografii z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego przedstawiono przełam próbki D2, który to charakteryzuje się prostym łamaniem.



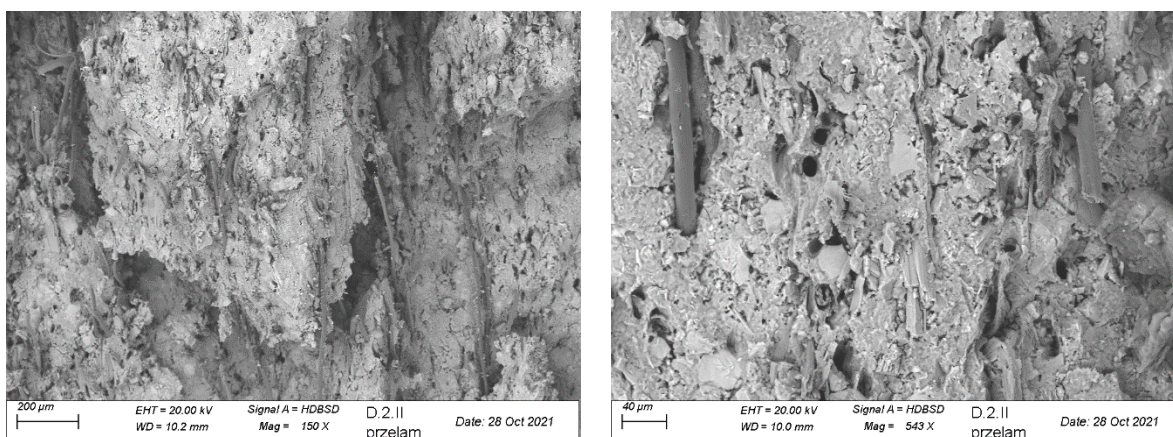
**Rys. 5.73.** Przełam próbki o oznaczeniu D2 z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego



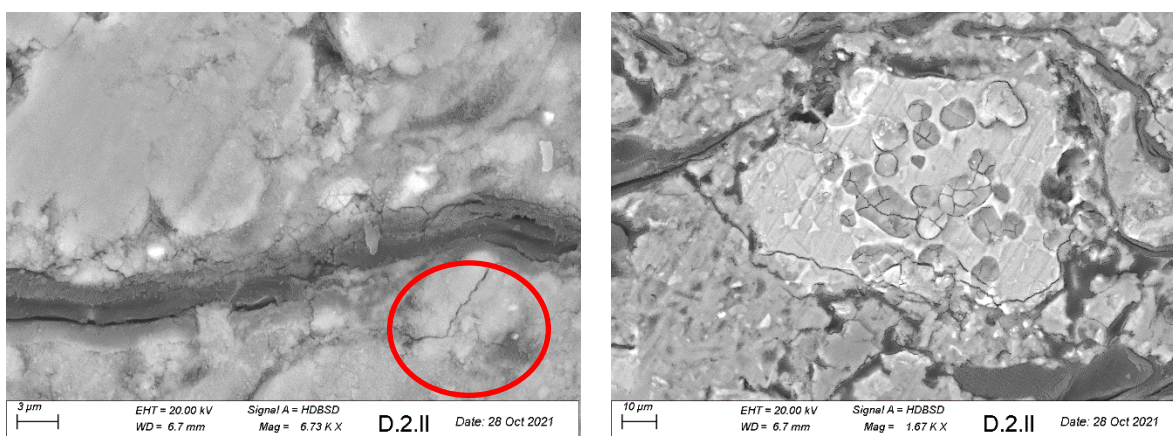
**Rys. 5.74.** Topografia przełamu próbki o oznaczeniu D2 z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego

Ponadto próbkę D2 poddano badaniu z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego w zakresie analizy przełamu (rysunek 5.75) oraz w zakresie analizy zglądu (rysunek 5.76). Próbką ta charakteryzuje się jednolitą strukturą w zakresie matrycy cementowej. Widoczne są w niej minimalne spękania wewnętrzne, szczególnie w obrębie włókien, co może oznaczać, iż takie temperatury powodują już

rozszerzalność materiału, a w obrębie włókien rozszerzalność ta jest największa z uwagi na ich „elastyczne” właściwości. W próbce nie zauważamy pirolizy, włókna zachowują swój naturalny kształt.



**Rys. 5.75.** Przelam próbki D2 z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego – strefa przypowierzchniowa



**Rys. 5.76.** Zgląd próbki D2 z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego – strefa przypowierzchniowa

Powyższe próbki poddano również badaniom w zakresie określenia parametrów wytrzymałościowych zgodnie z punktem 4.4 pracy. Przykładowe badanie serii płyt D dla próbki D4 (nr 018) przedstawiono na rysunku 5.77. Zniszczoną próbkę przy prawidłowym przelamie przedstawiono na rysunku 5.78.



**Rys. 5.77.** Badanie próbki D4 (nr 018) z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej

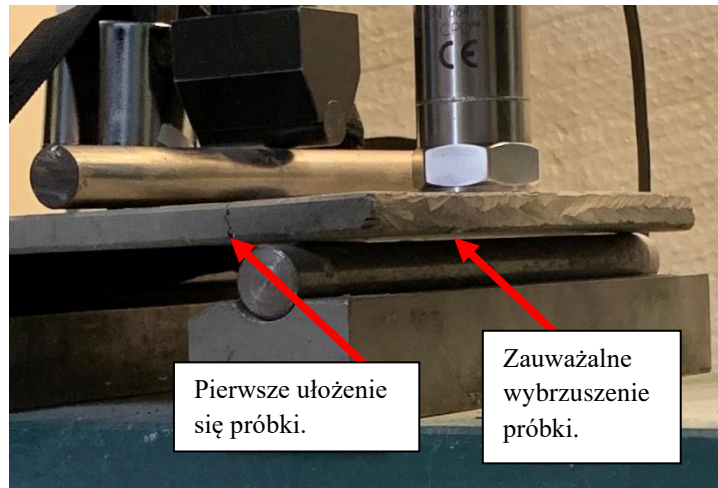


**Rys. 5.78.** Widok zniszczonej próbki D4 (nr 019) po próbie zginania w maszynie wytrzymałościowej

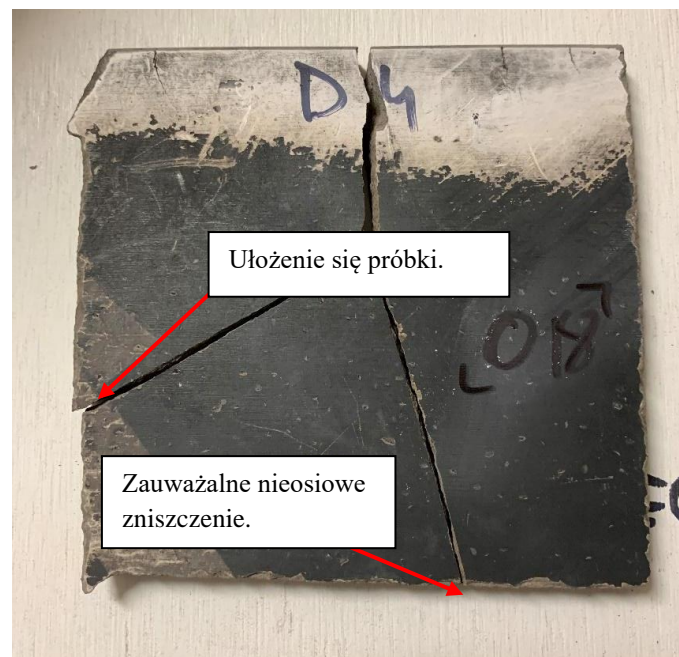
Taki kształt zniszczenia świadczy o tym, iż próbka miała stabilną, lecz jak wykazują badania z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego – istotnie zniszczoną strukturę. Temperatury panujące podczas badania na modelu rzeczywistym nie spowodowały znacznego wypaczenia jej z płaszczyzny. Przykład badania, gdzie próbka nie mogła zachować swojej płaszczyzny, przedstawiono na rysunku 5.79. Próbka po pobraniu wykazywała brak płaszczyzny – uległa wypaczeniu z uwagi na znaczące różnice temperatur na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej. Temperatury działające na próbce

przedstawiono na rysunkach 5.44 i 5.45 wskazując odpowiednio temperaturę 588°C na powierzchni okładzin i 392°C w przestrzeni wentylacyjnej w 10'00" minucie badania w tej samej lokalizacji.

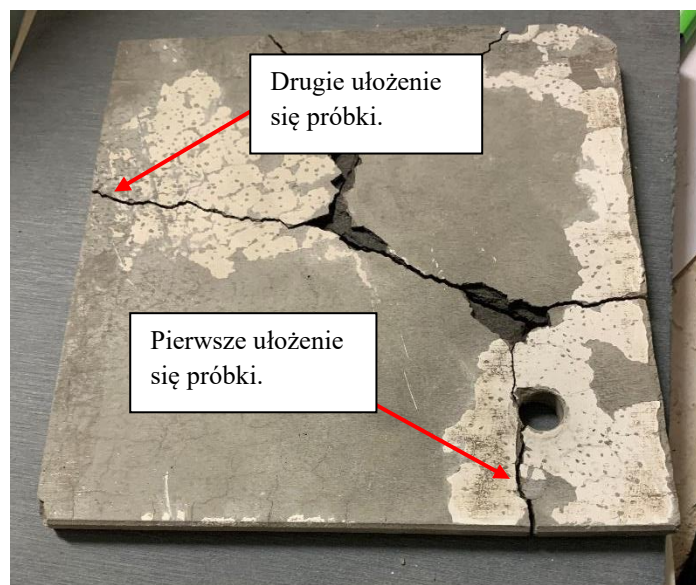
Kształt zniszczonych próbek z efektem „układania się” przedstawiono na rysunkach 5.80 i 5.81 kolejno dla próbek D4 i D3. Występowanie efektu „układania próbki” determinuje status destrukcji próbki jako krytyczną.



**Rys. 5.79.** Badanie próbki D3 (nr 015) po próbie zginania z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej – efekt „układania próbki”

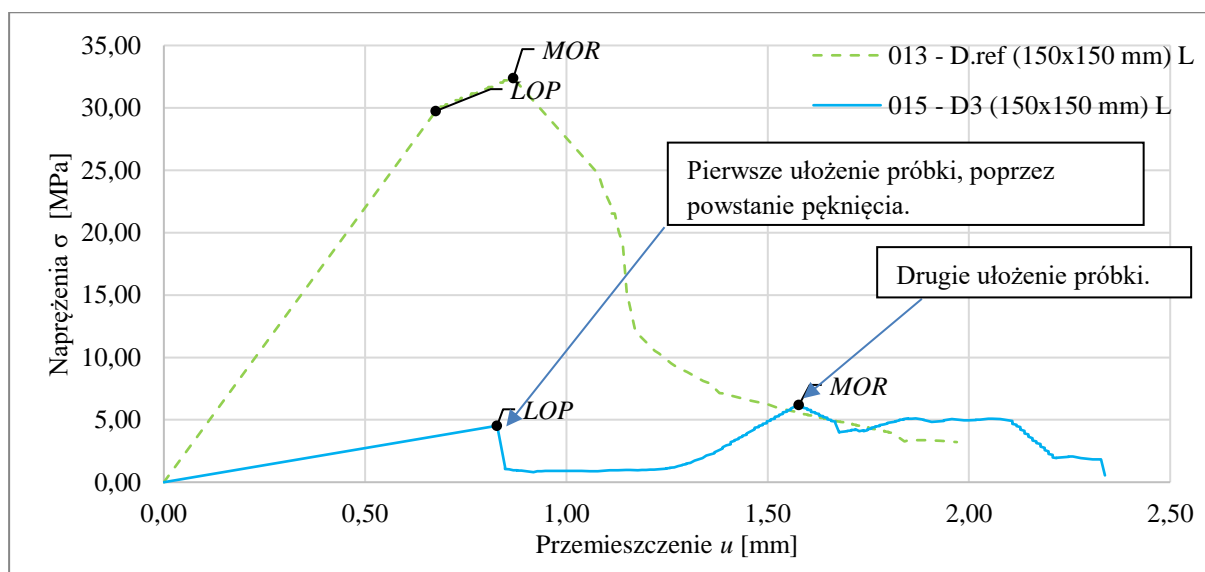


**Rys. 5.80.** Zniszczona próbka D4 (nr 018) po próbie zginania z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej – efekt „układania próbki”



**Rys. 5.81.** Zniszczona próbka D3 (nr 015) po próbie zginania z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej – efekt „układania próbki”

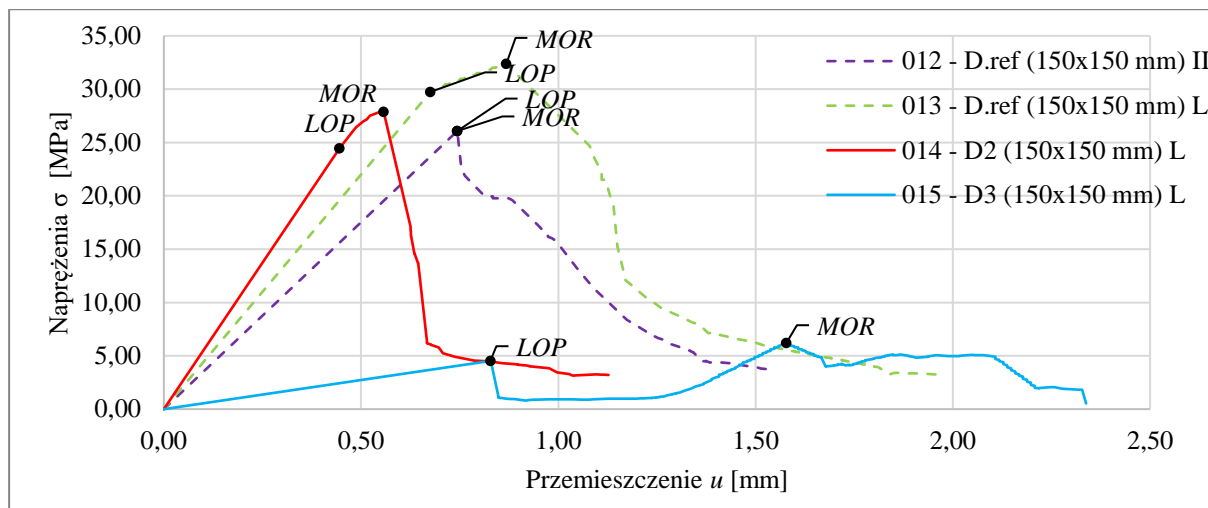
Zjawisko „układania próbki” spowodowane jest znacznym wypaczeniem płaszczyzny próbki i jej delaminacją. Zjawisko te można zaobserwować w przypadku płyt włóknisto-cementowych, poddanych oddziaływaniu wysoką temperaturą, która to spowodowała naruszenie struktury wewnętrznej, a następnie „wybrzuszenie/wypaczenie” próbek. Na wykresie 5.31 przedstawiono przebieg wytrzymałości na zginanie próbki D3 (nr 015) przy efekcie „układania próbki”.



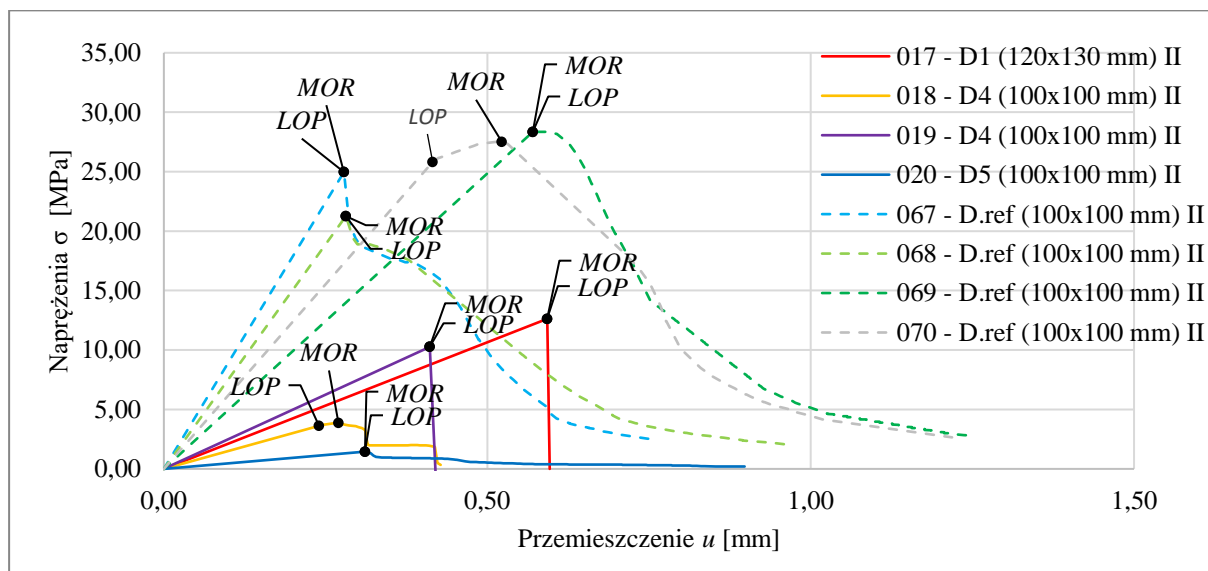
**Wykres 5.31.** Przebieg badania wytrzymałości na zginanie zgodnie z pkt. 4.4 dla próbek D3 – efekt „układania się”



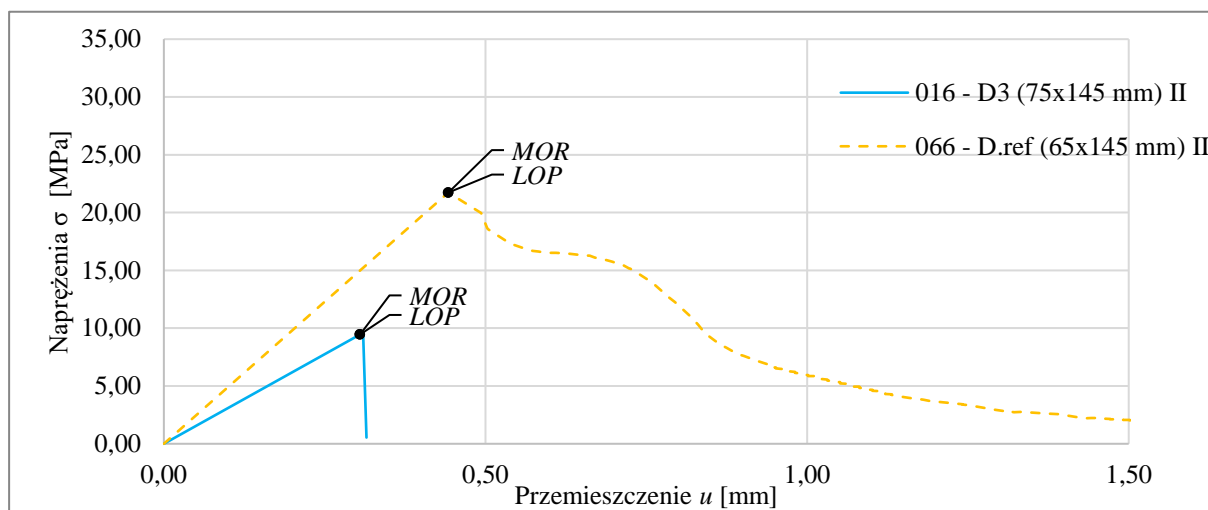
Badaniu wytrzymałości na zginanie *MOR* poddano łącznie 7 próbek serii D oznaczonych od D1 do D5. Na wykresach 5.32, 5.33 i 5.34, przedstawiono przebieg badania wytrzymałości na zginanie w podziale na różne wymiary badanych próbek.



**Wykres 5.32.** Przebieg badania wytrzymałości na zginanie zgodnie z pkt. 4.4 dla próbek pobranych z modelu wielkoskalowego serii badań D – cz. 1.



**Wykres 5.33.** Przebieg badania wytrzymałości na zginanie zgodnie z pkt. 4.4 dla próbek pobranych z modelu wielkoskalowego serii badań D – cz. 2.



**Wykres 5.34.** Przebieg badania wytrzymałości na zginanie zgodnie z pkt. 4.4 dla próbek pobranych z modelu wielkoskalowego serii badań D – cz. 3.

W celu określenia procentowego udziału strat wytrzymałości na zginanie próbek poddanych oddziaływaniu pożarem pozyskanych z badania modelu wielkoskalowego, wykonano wzorcowe badania. Jako wzorcowe zrealizowano badania próbek referencyjnych o identycznych wymiarach i tym samym kierunku prasowania. Wyniki parametrów wytrzymałościowych dla próbek referencyjnych zestawiono w tabeli 5.3.

**Tabela 5.3.** Zestawienie próbek z badania wielkoskalowego wraz z próbkami referencyjnymi

Oznaczenie Próbkki	MOR	LOP	$E_D$	$W_f$
	MPa	MPa	GPa	$1 / \int_{F_0}^{0,4F_{max}} F dx$
001 - D.ref (250x250 mm) L	31,13	29,44	22,10	1284,4
002 - D.ref (250x250 mm) II	22,13	22,13	19,41	636,3
003 - D.ref (250x250 mm) II	22,13	18,94	16,61	920,4
004 - D.ref (250x250 mm) L	28,88	20,63	17,08	1811,6
012 - D.ref (150x150 mm) II	26,08	26,08	9,16	793,1
013 - D.ref (150x150 mm) L	32,38	29,75	11,50	1135,8
057 - D.ref (200x200 mm) II	17,04	17,04	14,27	225,6
061 - D.ref (90x230 mm) II	18,23	18,23	18,64	76,1
066 - D.ref (65x145 mm) II	21,74	21,74	12,84	408,3
067 - D.ref (100x100 mm) II	24,98	24,98	9,69	756,3
068 - D.ref (100x100 mm) II	21,26	21,26	8,16	652,5
069 - D.ref (100x100 mm) II	28,35	28,35	5,37	841,3
070 - D.ref (100x100 mm) II	27,51	25,82	6,71	782,5

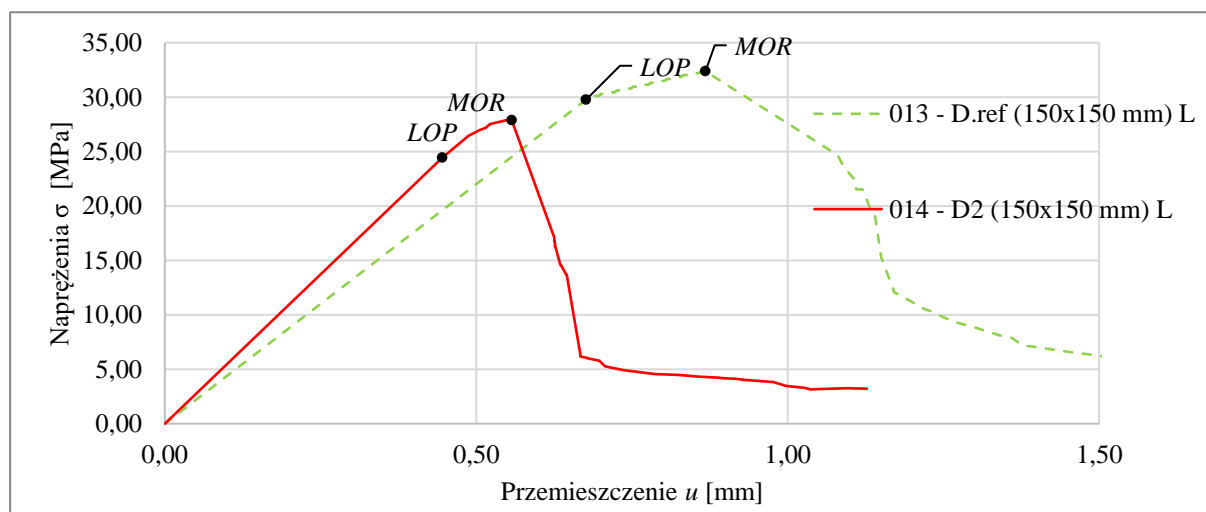
Wyniki próbek poddanych oddziaływaniem pożaru przedstawiono tabelarycznie, odnosząc ich charakterystyczne parametry do próbek referencyjnych o takich samych wymiarach. Wyniki te zamieszczono w tabeli 5.4. Kolejno przypisano im odpowiedni stopień destrukcji: nieistotna destrukcja, istotna destrukcja, krytyczna destrukcja zgodnie z klasyfikacją przedstawioną w pkt. 4.7. Próbką D2, zakwalifikowana jako posiadająca istotną destrukcję, nadal przedstawia dobre parametry wytrzymałościowe, a dokładniej 86% wytrzymałości na zginanie *MOR* próbki referencyjnej.

**Tabela 5.4.** Oznaczenie stopnia destrukcji próbek z serii płyt D

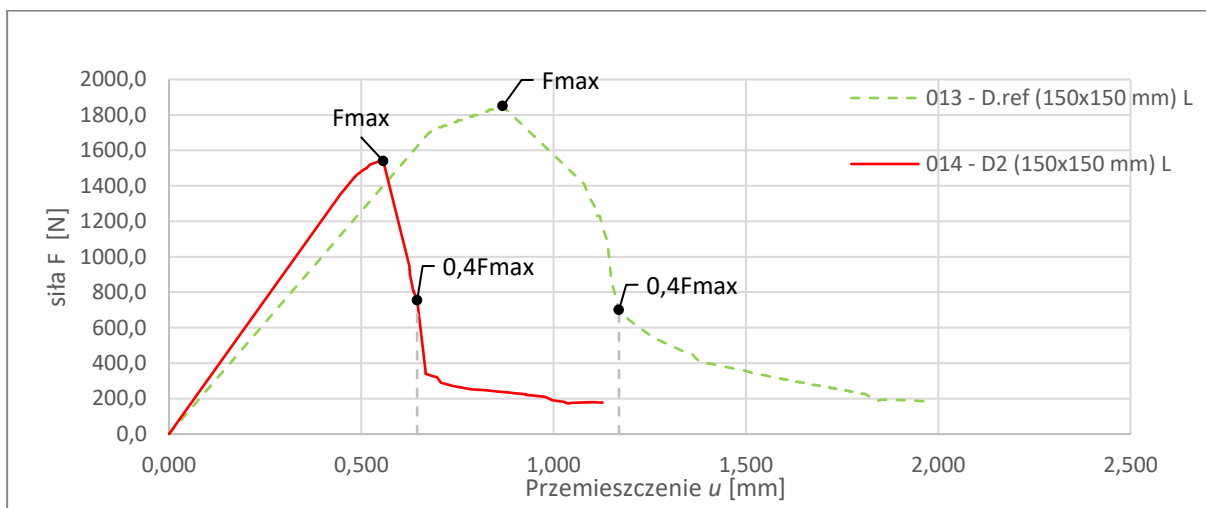
Oznaczenie Próbkki	<i>MOR</i>	Wartość średnia <i>MOR</i> próbki ref.	[%] wartość	<i>LOP</i>	Wartość średnia <i>LOP</i> próbki ref.	[%] wartość	<i>E<sub>D</sub></i>	Wartość średnia <i>E<sub>D</sub></i> próbki ref.	[%] wartość	<i>W<sub>f</sub></i>	Wartość średnia <i>W<sub>f</sub></i> próbki ref.	[%] wartość	Stopień destrukcji
	MPa			MPa			GPa			$1/\int_{F_0}^{0,4F_{max}} F dx$			
014 - D2 (150x150 mm) L	27,88	32,38	86,1%	24,44	29,75	82,2%	14,35	11,50	124,7%	488,0	1135,80	42,97%	Istotna destrukcja
015 - D3 (150x150 mm) L	6,20		19,1%	4,53		15,2%	1,43		12,4%	301,7		26,57%	Krytyczna destrukcja
016 - D3 (75x145 mm) II	9,45	21,74	43,5%	9,45	21,74	43,5%	8,10	12,84	63,1%	71,7	408,33	17,55%	Krytyczna destrukcja
017 - D1 (120x130 mm) II	12,62	25,52	49,5%	12,62	25,10	50,3%	5,57	7,48	74,4%	179,3	758,13	23,65%	Krytyczna destrukcja
018 - D4 (100x100 mm) II	3,86		15,1%	3,61		14,4%	1,63		21,7%	67,5		8,91%	Krytyczna destrukcja
019 - D4 (100x100 mm) II	10,26		40,2%	10,26		40,9%	2,70		36,0%	159,5		21,04%	Krytyczna destrukcja
020 - D5 (100x100 mm) II	1,45		5,7%	1,45		5,8%	0,50		6,7%	28,1		3,71%	Krytyczna destrukcja

Kolejno dalszej analizie poddano próbki niewykazujące krytycznej destrukcji. W przypadku serii płyt D, była to wyłącznie próbka o oznaczeniu D2. Próbka ta, pomimo znaczących spadków w zakresie modułu sprężystości, prezentuje nadal dobrą wytrzymałości na zginanie *MOR*.

Na wykresach 5.35 i 5.36 przedstawiono wytrzymałość próbki D2 w odniesieniu do próbki referencyjnej o takich samych gabarytach (wymiary 145 × 150 mm). Należy zauważyć, iż pomimo podobnych wartości wytrzymałości na zginanie *MOR* i granicy proporcjonalności *LOP* próbki D2 oraz próbki referencyjnej, przebieg zakresu plastycznego próbki D2 ma całkowicie inny – bardziej niekorzystny przebieg. Wskazuje to, iż strefa plastyczna, po przekroczeniu maksymalnej wytrzymałości na zginanie *MOR* niemalże całkowicie znika. Na rysunkach 5.75 i 5.76 dotyczących badania próbki z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego wykazano brak pirolizy. Zachodzi tu sytuacja, podczas której włókna tracą swoją elastyczność, stają się kruche, a przy odkształceniu zrywają się, nie ulegając dalszym odkształceniom. Łatwiej to zagadnienie można zaobserwować przy wykorzystaniu mikroskopu cyfrowego, w którym to obraz możemy zaobserwować w pełnej palecie kolorów. Włókna podczas działania na nie krytycznej temperatury ulegają tzw. „przebarwianiu włókien” - efekt nabierania kolorystyki brązowej wraz z utratą w niewielkim zakresie wytrzymałości, oraz prawie całkowitym zatraceniu elastyczności włókien. Sytuacja ta występuje, gdy temperatura ogrzewania włókien przekracza punkt topnienia. Włókna wówczas tracą swoje właściwości stają się kruche i zyskują brązowy odcień, następnie przechodząc przez całkowite zbrązowienie, a kończąc na pirolizie.



Wykres 5.35. Przebieg badania wytrzymałości na zginanie zgodnie z pkt. 4.4 dla próbki D2 – cz. 1.

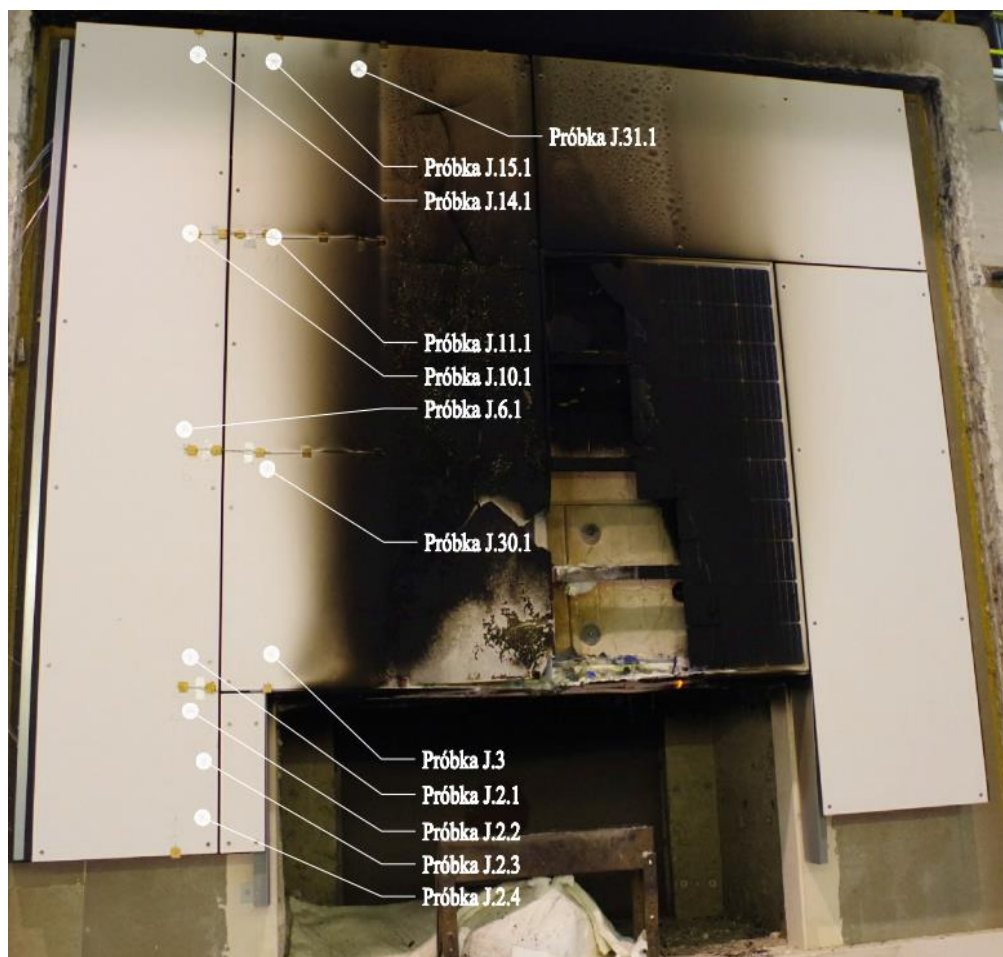


**Wykres 5.36.** Przebieg badania wytrzymałości na zginanie zgodnie z pkt. 4.4 dla próbki D2 – cz. 2.

Oceniając parametry wytrzymałościowe, należy stwierdzić, że próbka D2 wykazuje istotną destrukcję, lecz nadaje się do powtórnego użycia. Jej ponowne użycie nie może wiązać się z wykorzystaniem jako okładzina zewnętrzna budynku.

## 5.2.2 Seria badań J

Kolejno badaniu poddano serię J. Seria ta odnosi się do badania wielkoskalowego na modelu rzeczywistym elewacji, które to trwało 120 min. Do przygotowania próbek pobrano materiały ze modelu poddanego oddziaływaniu pożarem w lokalizacjach wskazanych na rysunku 5.82.

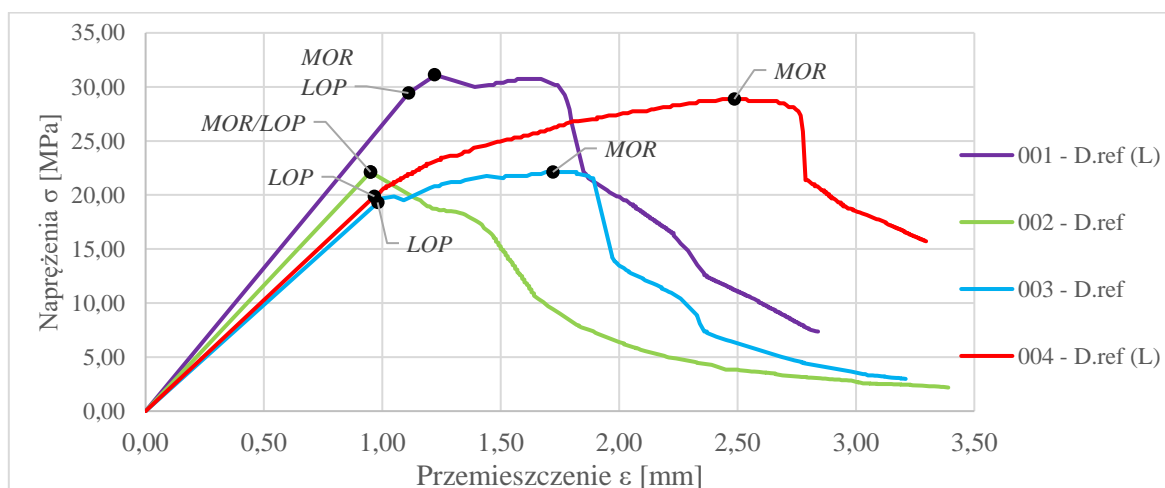


Rys. 5.82. Lokalizacja pobranych próbek dla serii badań J

Seria J została zweryfikowana następującymi metodami badawczymi:

- badanie wytrzymałości na zginanie *MOR* wg PN-EN 12467 zgodnie z pkt. 4.4;
- analiza powierzchni pod mikroskopem cyfrowym zgodnie z pkt. 4.5;
- analiza struktury pod SEM zgodnie z pkt. 4.6;
- analiza wizualna próbek.

Seria badań J została wykonana z tych samych płyt włóknisto-cementowych co seria badań D oraz seria badań E. Na potrzeby późniejszych analiz wykorzystano przebieg wytrzymałości na zginanie próbek referencyjnych D. ref - ponownie przedstawiony na wykresie 5.37.



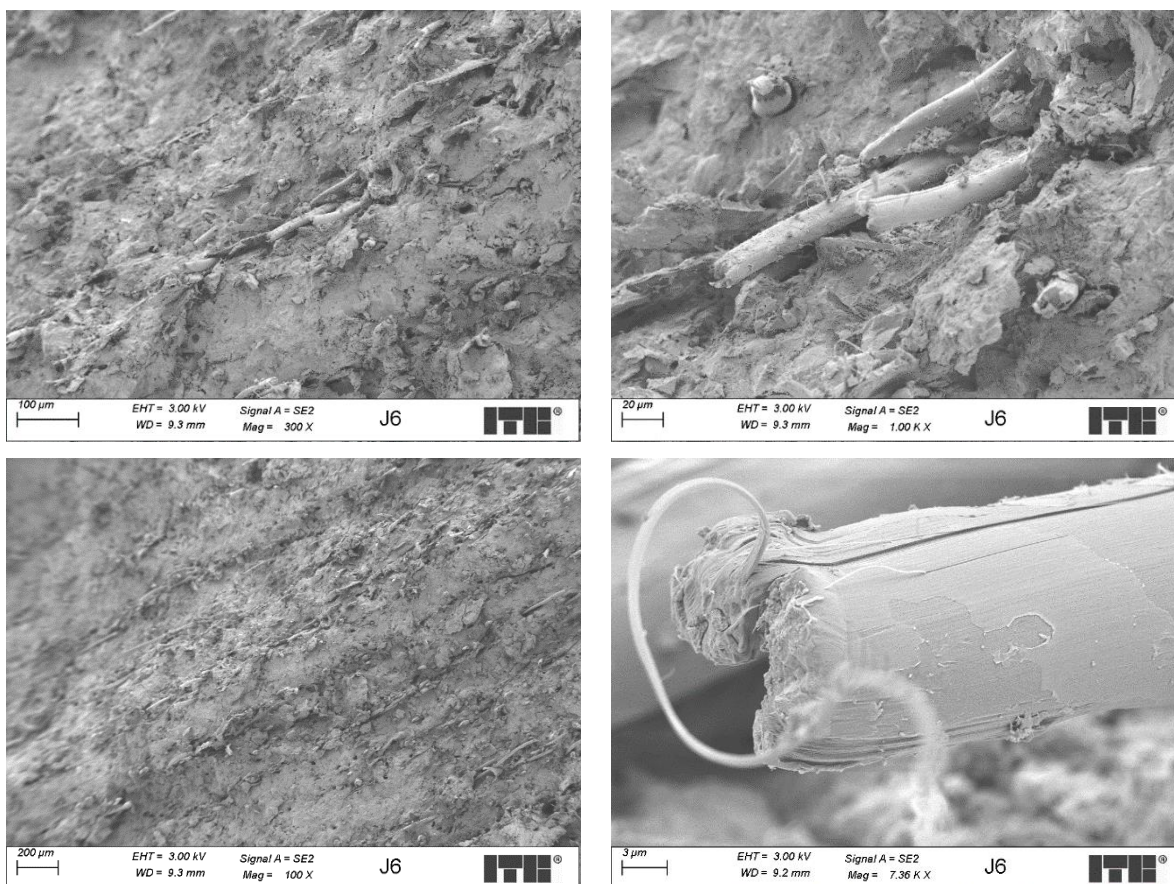
**Wykres 5.37.** Przebieg wytrzymałości na zginanie *MOR* próbek referencyjnych (J. ref) D. ref o wymiarach 250 × 250 mm

Strukturę powierzchni przełamu próbek referencyjnych z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego przedstawiono na rysunku 5.52. Z kolei topografię powierzchni przełamu na próbkach referencyjnych z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego przedstawiono na rysunku 5.53, które to odpowiadają serii D. Nie wykonano ponownej analizy próbek referencyjnych z uwagi, iż jedyną różnicą w stosunku do płyt serii D była kolorystyka farby/powłoki.

W serii badań J próbki zostały pobrane z elementów ościennych, gdzie panowała niższa temperatura, a nie ze strefy pióropusza jak w przypadku serii D.

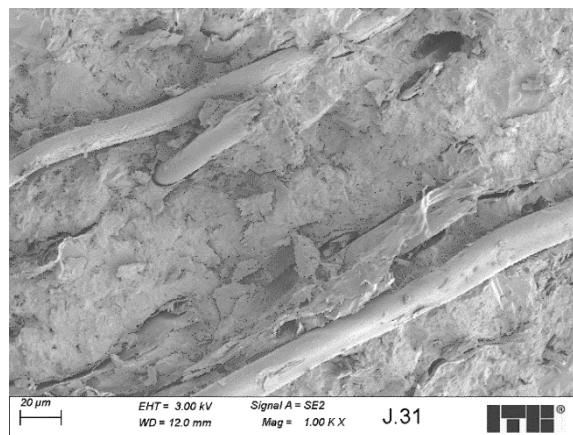
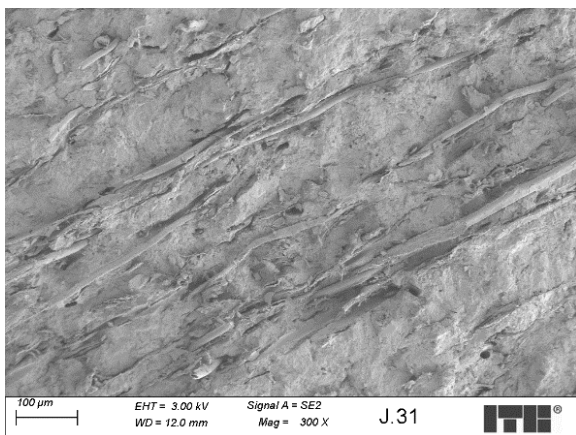
Pierwszym elementem poddanym analizie była próbka J6, której to lokalizację wskazywała termopara TE6. Termopara TE6 w 10'00" minucie badania wskazywała temperaturę 50°C, w 30'00" minucie – 100°C, osiągając temperaturę około 150°C w 60'00" minucie i maksymalnie około 180°C w dalszej fazie badania (przedstawiono na rysunku 5.33). Całka temperatury i czasu dla próbki J6 wykazywały około 93000 s°C w 120'00" minucie badania. Zdjęcia próbki po oddziaływaniu pożarem z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego przedstawiono na rysunku 5.83.





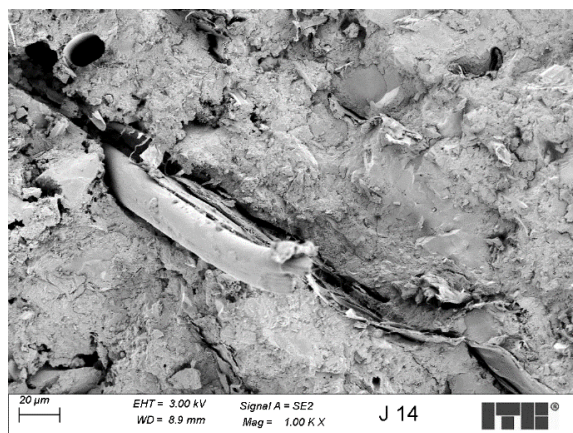
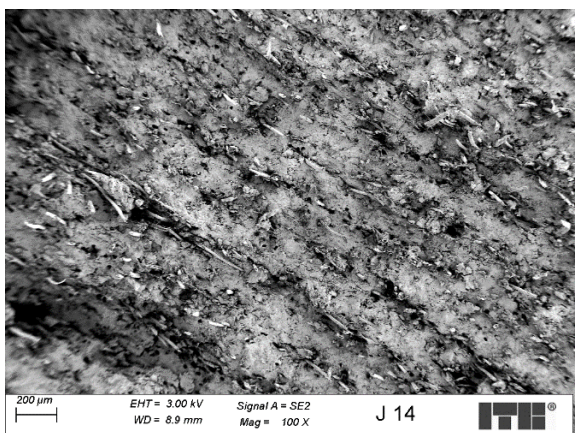
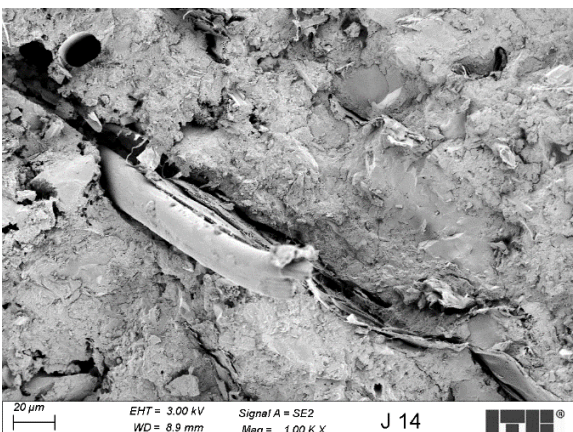
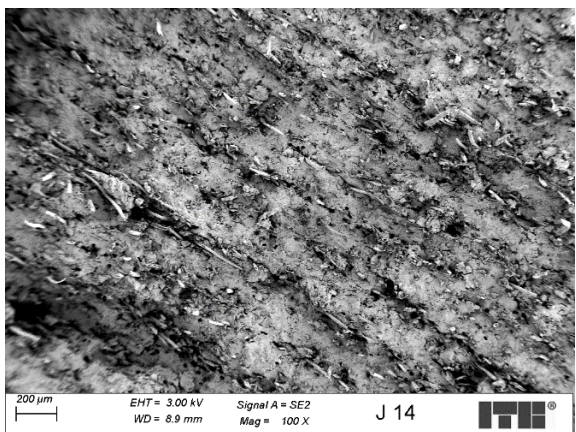
**Rys. 5.83.** Przełam próbki J6 z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego

Lokalizacja próbki J31 była zbliżona z lokalizacją termopary TE6, zgodnie z rysunkiem 5.33. Maksymalne temperatury działające na próbkę to około 220°C od około 40'00" minuty. Próbka pomimo temperatur przekraczających 200°C posiada bardzo dobrze zachowane włókna oraz nie wykazuje zniszczenia matrycy cementowej. Obraz z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego przedstawiono na rysunku 5.84. Poniższe zdjęcia wskazują, iż temperatury w okolicach 220°C nawet w dłuższym czasie nie są krytyczne dla struktury płyt włóknisto-cementowych.



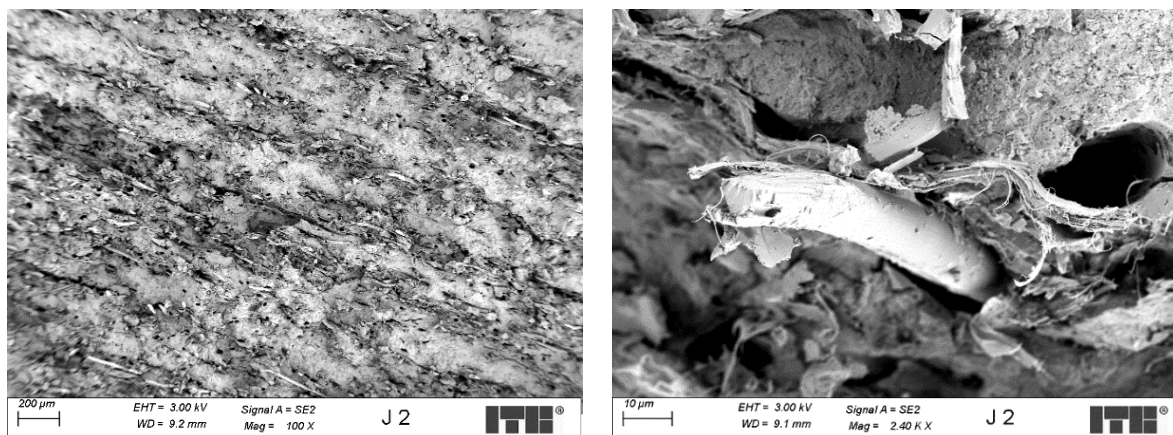
**Rys. 5.84.** Przełam próbki J31 z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego

Próbka J14 została pobrana z lokalizacji przedstawionej na rysunku 5.81. Odpowiadała ona lokalizacyjne termoparze TE6 (rysunek 5.33). Próbkę poddano badaniu z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego, przedstawiając wyniki na rysunku 5.84. Próbka nie wykazuje oznak zniszczenia, wpływ na to miały niskie temperatury działające w tej części, które wskazywały jedynie około 40°C.



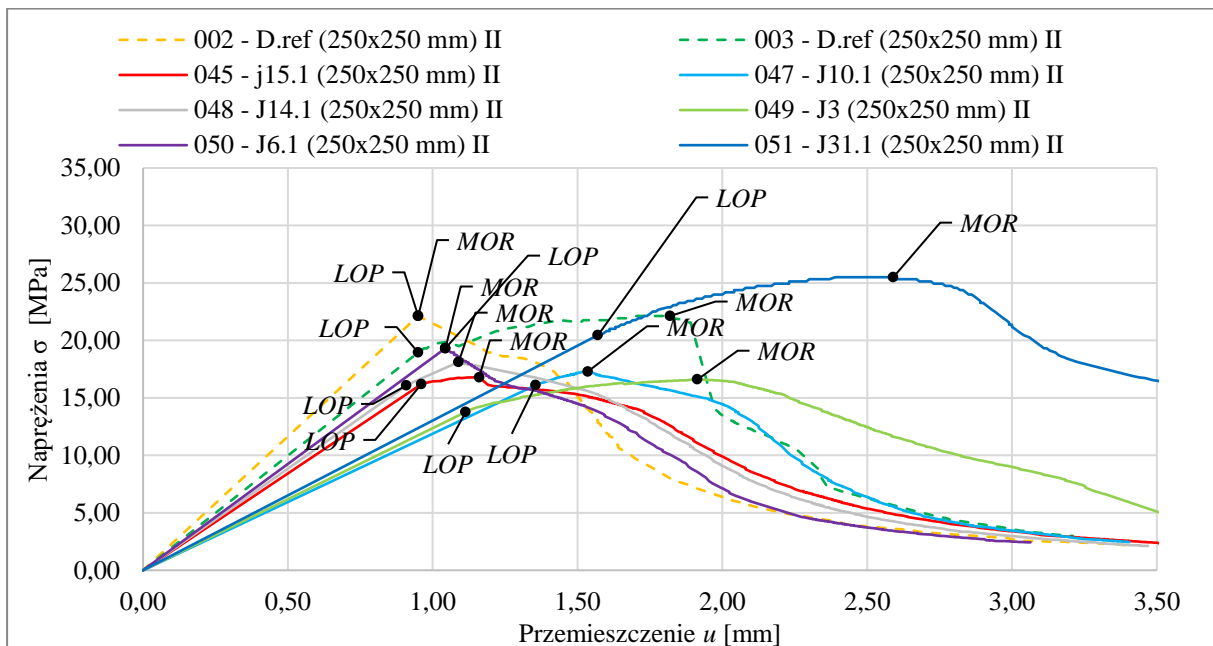
**Rys. 5.85.** Przełam próbki J14 z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego

Kolejną próbką poddaną analizie była próbka J2, która to lokalizacyjnie odpowiadała termoparze TE6 zgodnie z rysunkiem 5.33. Próbka nie wykazuje destrukcji spowodowanej oddziaływaniem temperatury z uwagi na niską wartość tej temperatury. Zdjęcia próbki przedstawiono na rysunku 5.86.

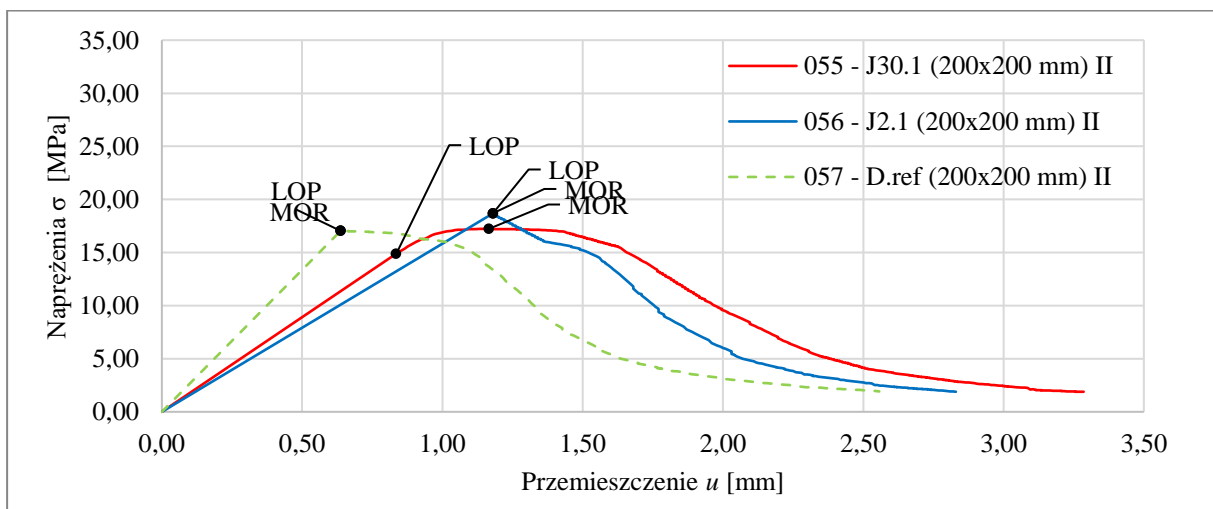


**Rys. 5.86.** Przełam próbki J2 z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego

Pobrane próbki z modelu rzeczywistego serii badań J poddanego oddziaływaniu pożarem przebadano w zakresie wytrzymałości na zginanie *MOR*, a następnie porównano z próbkami referencyjnymi. Z uwagi na to, iż analizy dokonano na próbkach nieobjętych bezpośrednio pióropuszem, była możliwość pobrania próbek o większych wymiarach – zalecanych  $250 \times 250$  mm oraz w przypadku braku możliwości –  $200 \times 200$  mm. Wyniki wytrzymałości na zginanie *MOR* próbek poddanych badaniu oraz próbek referencyjnych przedstawiono na wykresach 5.38 – dla próbek o gabarytach  $250 \times 250$  mm, 5.39 – dla próbek o gabarytach  $200 \times 200$  mm.



**Wykres 5.38.** Przebieg badania wytrzymałości na zginanie zgodnie z pkt. 4.4 dla próbek pobranych z modelu wielkoskalowego serii badań J – cz. 1.



**Wykres 5.39.** Przebieg badania wytrzymałości na zginanie zgodnie z pkt. 4.4 dla próbek pobranych z modelu wielkoskalowego serii badań J – cz. 2.

Powyższe wyniki zestawiono również tabelarycznie w tabeli 5.5. Wszystkie próbki z wyłączeniem próbki J6.1 (050) wykazały nieistotną destrukcję. Pomimo iż w znaczącej części modelu rzeczywistego, z którego zostały pobrane próbki temperatury podczas badania były niskie, to parametry wytrzymałościowe próbek pobranych po badaniu i tak wykazywały spadek względem próbek referencyjnych.

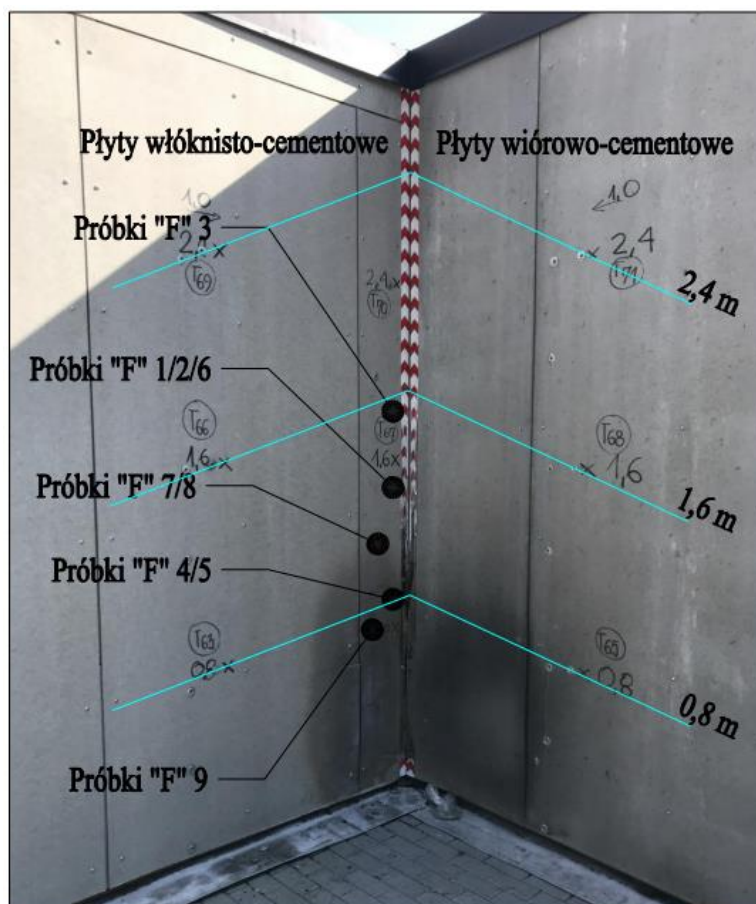
Tabela 5.5. Oznaczenie stopnia destrukcji próbek z serii badań J

Oznaczenie próbki	MOR	Wartość średnia MOR próbki ref.	[%] wartość	LOP	Wartość średnia LOP próbki ref.	[%] wartość	Ed	Wartość średnia Ed próbki ref.	[%] wartość	Wf	Wartość średnia Wf próbki ref.	[%] wartość	Stopień destrukcji
	MPa			MPa			GPa			$1/\int_{F_0}^{0,4F_{max}} F dx$			
045 – J.15.1 (250x250 mm) II	16,78	22,13	75,8%	16,18	20,53	78,8%	14,04	18,01	78,0%	678,8	778,35	87,2%	Nieistotna destrukcja
047 – J.10.1 (250x250 mm) II	17,29		78,1%	16,11		78,4%	9,90		55,0%	693,9		89,2%	Nieistotna destrukcja
048 – J.14.1 (250x250 mm) II	18,11		81,9%	16,09		78,4%	14,74		81,9%	666,5		85,6%	Nieistotna destrukcja
049 – J.3 (250x250 mm) II	16,59		75,0%	13,76		67,0%	10,30		57,2%	979,8		125,9%	Nieistotna destrukcja
050 – J.6.1 (250x250 mm) II	19,31		87,3%	19,31		94,1%	15,42		85,6%	606,8		78,0%	Istotna destrukcja
051 – J.31.1 (250x250 mm) II	25,50		115,3%	20,44		99,5%	10,85		60,2%	2017,0		259,1%	Nieistotna destrukcja
055 – J.30.1 (200x200 mm) II	17,23	17,04	101,1%	14,87	17,04	87,2%	9,49	14,27	66,5%	231,3	225,63	102,5%	Nieistotna destrukcja
056 – J.2.1 (200x200 mm) II	18,69		109,7%	18,69		109,7%	8,45		59,2%	250,6		111,1%	Nieistotna destrukcja

Płyty włóknisto-cementowe pobrane z modelu rzeczywistego w serii J po oddziaływaniu pożarem wykazują bardzo dobre parametry wytrzymałościowe. Według kryteriów przyjętych do oceny znaczna ich część charakteryzuje się „nieistotną destrukcją”, a tylko jedna próbka wykazuje istotną destrukcję (050 – J.6.1 (250×250 mm) II). Należy jednak zauważyć, iż pomimo oddziaływania tak niskimi temperaturami, próbki i tak charakteryzują się niższymi parametrami wytrzymałościowymi aniżeli próbki referencyjne. Należy postawić tutaj wnioski, iż nawet względnie małe temperatury mogą oddziaływać negatywnie na parametry płyt włóknisto-cementowych.

### 5.2.3 Seria badań F

Seria badań F odnosi się do badania wielkoskalowego na budynku modelowym. Badanie trwało do momentu wypalenia się paliwa, jakim były drewniane belki. Próbki zostały pobrane po badaniu z elewacji. Lokalizacje pobranych próbek przedstawiono na rysunku 5.87. Badanie odbyło się przy wietrznej pogodzie, temperatura zewnętrzna wynosiła 19°C, a temperatur odczytane przez termopary były niskie, maksymalnie około 390°C.

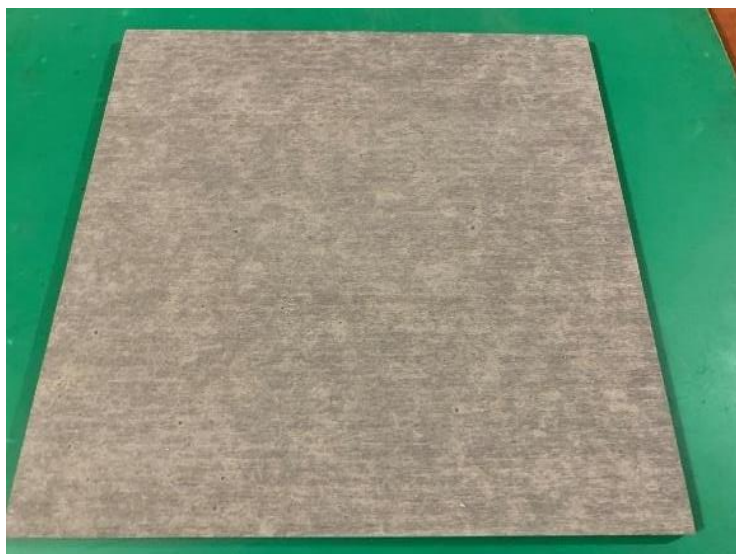


Rys. 5.87. Lokalizacja pobranych próbek dla serii badań F

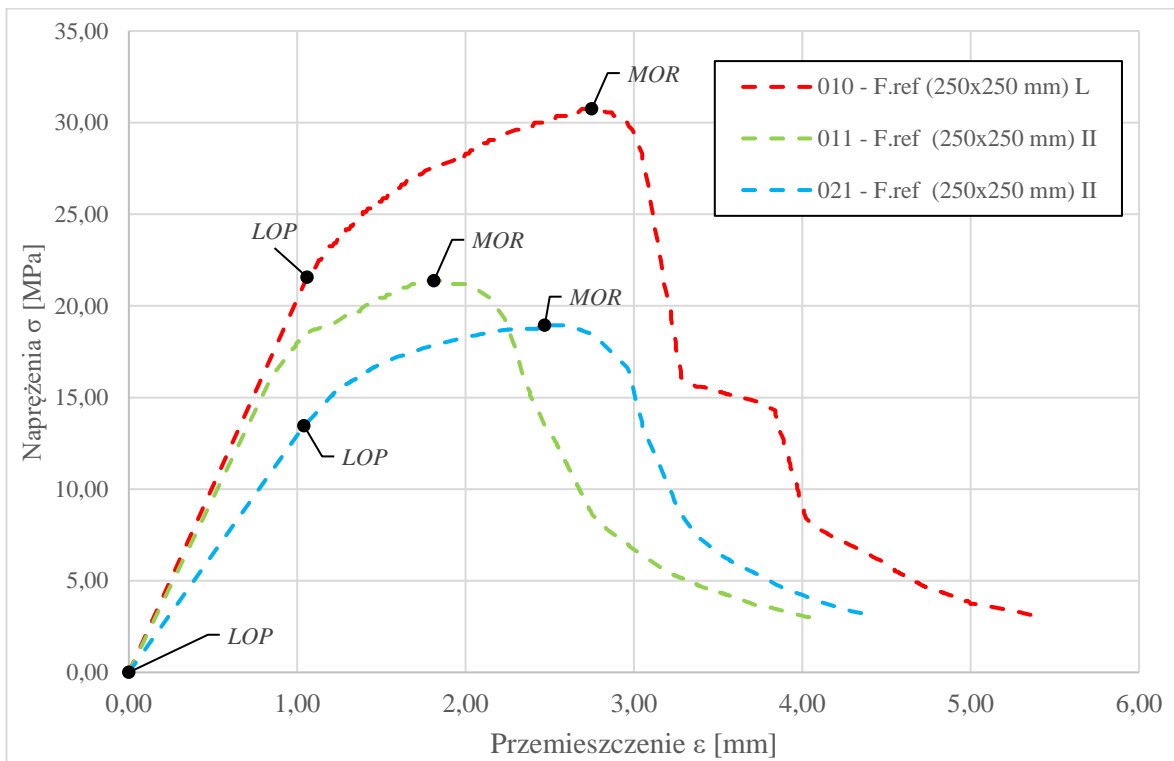
Seria F została zweryfikowana następującymi metodami badawczymi:

- badanie wytrzymałości na zginanie *MOR* wg PN-EN 12467 zgodnie z pkt. 4.4;
- analiza powierzchni pod mikroskopem cyfrowym zgodnie z pkt. 4.5;
- analiza struktury pod SEM zgodnie z pkt. 4.6;
- analiza wizualna próbek.

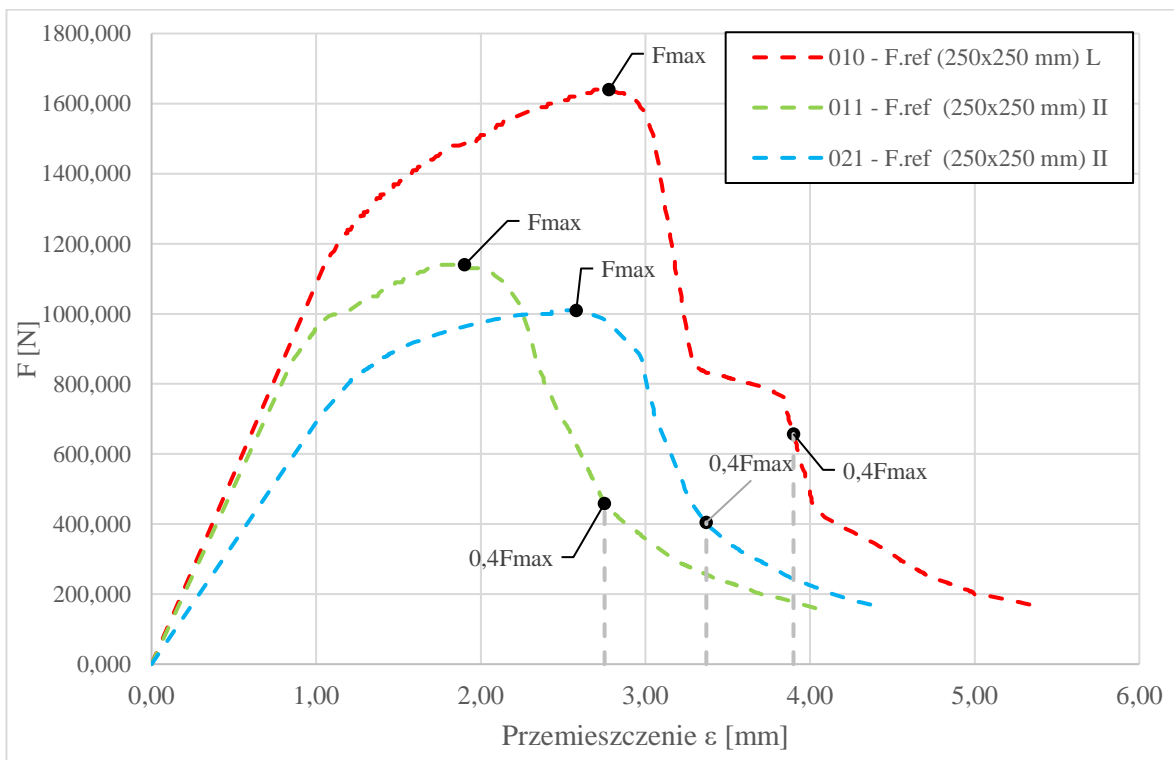
W pierwszym kroku analizie poddano próbkę referencyjną. Próbka ma stałą powierzchnię, charakteryzuje się dużą wytrzymałością na zginanie *MOR*. Przykładową płytę serii F przedstawiono na rysunku 5.88. Wykresy wytrzymałości na zginanie dla próbek referencyjnych przedstawiono na wykresie 5.40, a pracę łamania  $W_f$  – na wykresie 5.41. Próbka referencyjna F. ref, o oznaczeniu 010, była przebadana w prostym kierunku prasowania włókien do kierunku zginania. W przypadku próbek o oznaczeniach 011 i 021 kierunek ułożenia był równoległy do kierunku zginania. Na wykresach zauważalne są różnice przebiegu oraz wytrzymałości na zginanie *MOR* w zależności od tego, w którym kierunku ułożenia próbek wykonano badanie trójpunktowego zginania.



**Rys. 5.88.** Widok próbki płyty F – referencyjnej



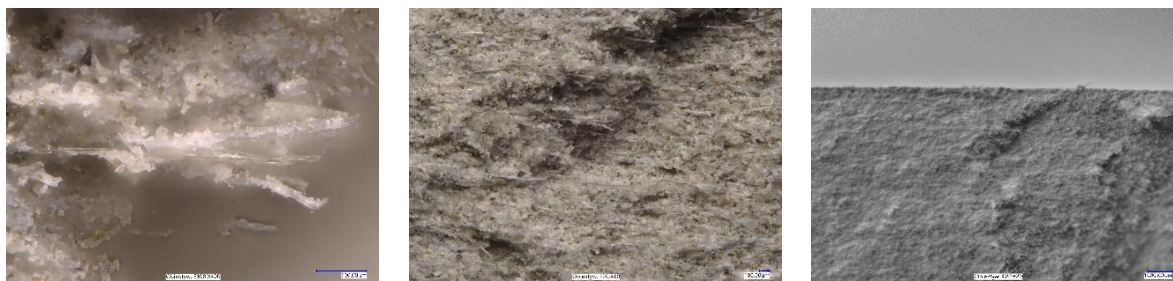
**Wykres 5.40.** Przebieg badania wytrzymałości na zginanie zgodnie z pkt. 4.4 dla próbek referencyjnych serii badań F o wymiarach 250 × 250 mm



**Wykres 5.41.** Wskazanie parametrów koniecznych do obliczenia pracy łamania  $W_f$  dla próbek referencyjnych F. ref o wymiarach 250 × 250 mm



Widok przełamu próbki referencyjnej F.ref z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego przedstawiono na rysunku 5.89. Zauważalna jest tam stała, jednolita struktura oraz wyraźny kierunek prasowania zbieżny z kierunkiem układania się włókien.



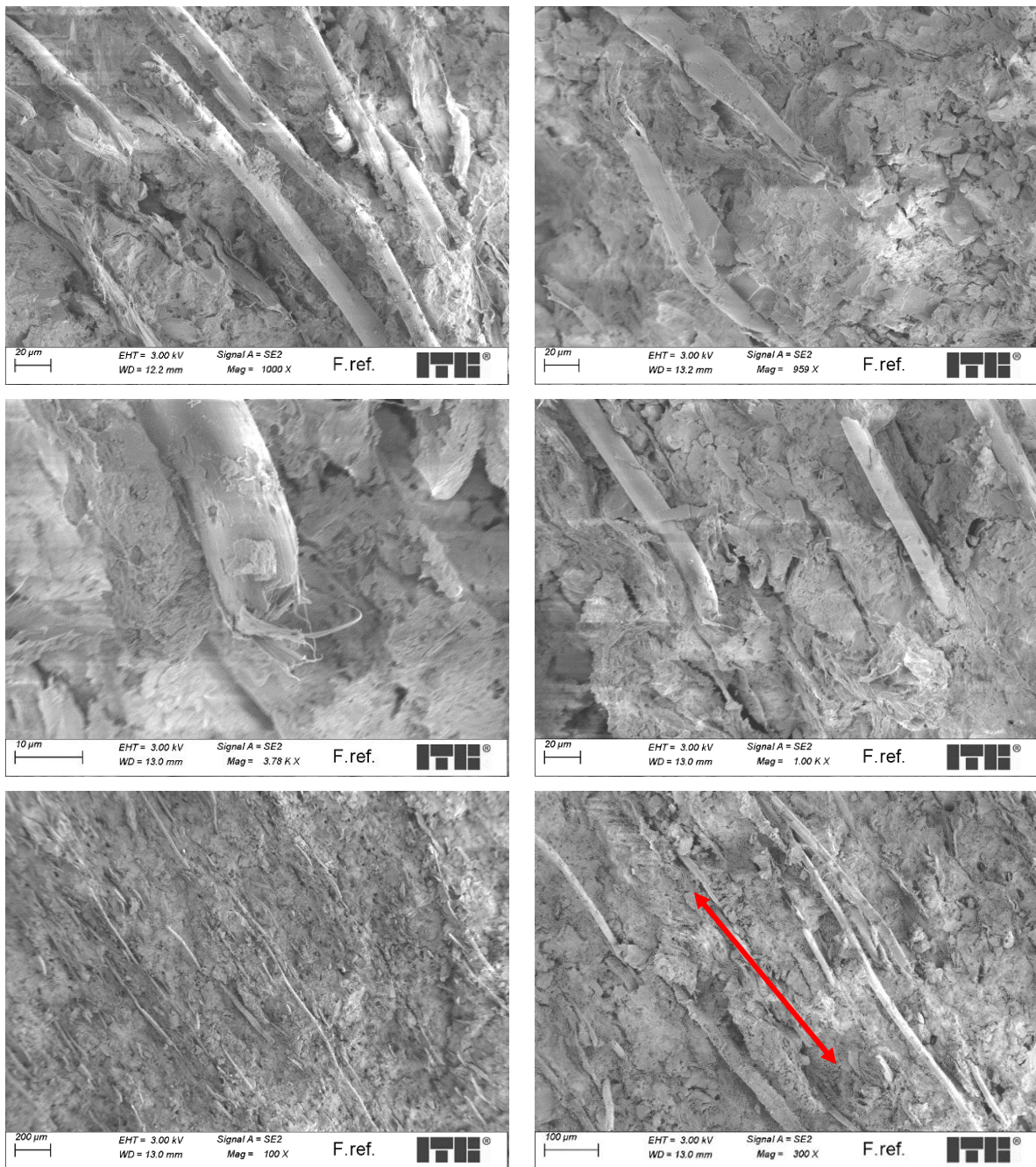
**Rys. 5.89.** Widok przełamu próbki o oznaczeniu F. ref z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego

Wyznaczone parametry wytrzymałościowe dla próbek referencyjnych przedstawiono w tabeli 5.6. Kierunek „prasowania”, który kształtuje główny kierunek rozkładu włókien (przedstawiono na zdjęciach powyżej), w znaczący sposób wpływa na wyznaczone parametry wytrzymałościowe, wskazując parametry niejednokrotnie większe nawet o 50% w stosunku do drugiego, prostopadłego kierunku. Na potrzeby późniejszych badań przyjęto (jeżeli była taka możliwość) wykonywanie pomiarów w kierunku równoległym, bardziej niekorzystnym – cechującym się niższą wytrzymałością na zginanie MOR.

Na rysunku 5.90 przedstawiono analizę próbki referencyjnej F.ref z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego. Nie sposób tam określić przeważającego sposobu zniszczenia próbki, co jest charakterystyczne dla próbek, które nie zostały poddane oddziaływaniu wysokimi temperaturami – częściowo widoczne jest zniszczenie poprzez wyciągnięcie włókien, częściowo poprzez ich zerwanie.

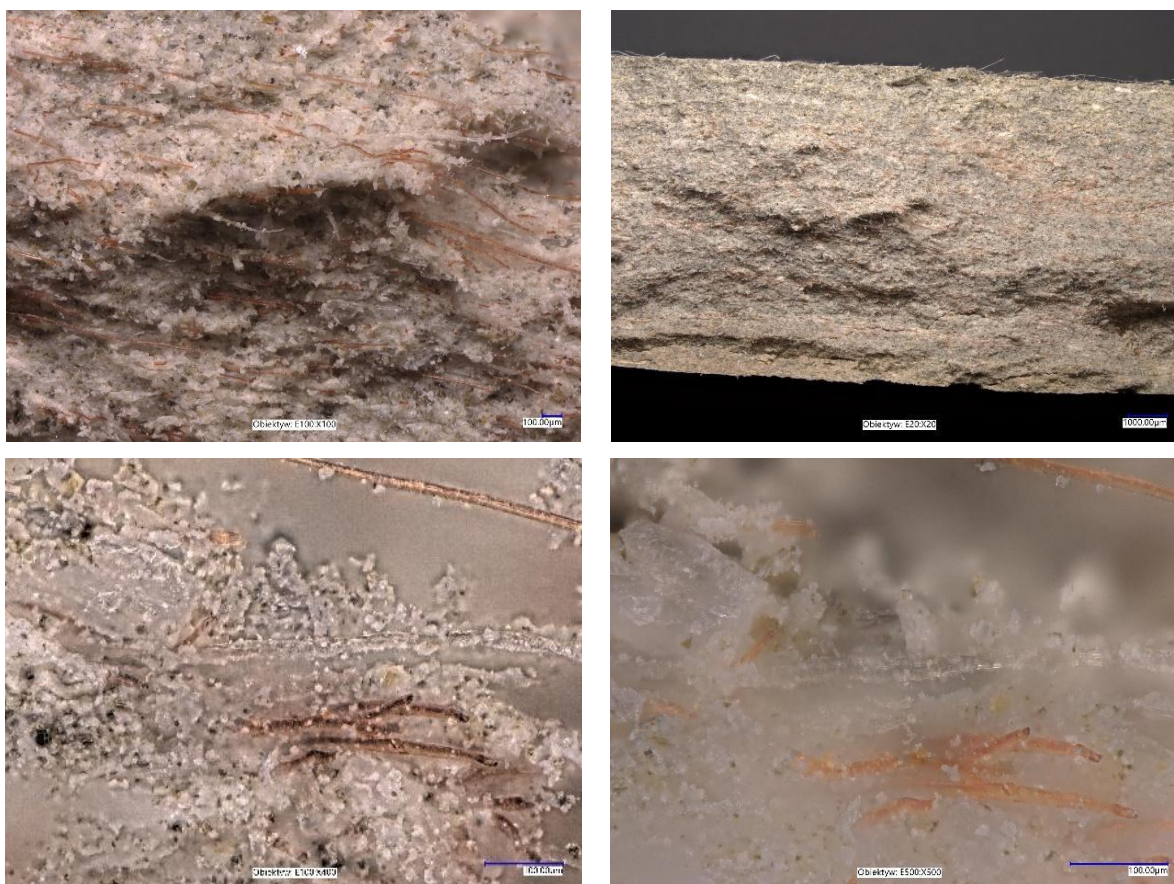
**Tabela 5.6.** Parametry charakterystyczne wyznaczone dla próbek referencyjnych F. ref.

Oznaczenie Próbkki	MOR	LOP	$E_D$	$W_f$
	MPa	MPa	GPa	$1 / \int_{F_0}^{0,4F_{max}} F dx$
010 - F.ref (250x250 mm) L	30,75	21,56	16,96	2167,5
011 - F.ref (250x250 mm) II	21,37	15,95	15,85	1103,1
021 - F.ref (250x250 mm) II	18,94	13,46	10,78	1206,7
026 - F.ref (150x150 mm) II	19,08	13,09	6,98	992,8
029 - F.ref (150x150 mm) II	19,25	15,23	6,98	943,2
030 - F.ref (100x100 mm) II	20,42	15,73	4,142	887,1
034 - F.ref (100x100 mm) II	19,58	15,32	4,72	820,4



**Rys. 5.90.** Widok przełamu próbki o oznaczeniu F. ref z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego

W kolejnym kroku poddano analizie próbki pobrane z badania wielkoskalowego. Lokalizację pobranych próbek dla serii F przedstawiono na rysunku 5.87. W pierwszym kroku przebadano próbki o oznaczeniu F5, które były blisko źródła ognia. Ich powierzchnie z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego przedstawiono na rysunku 5.91. Widoczne są przebarwienia włókien wskazujące, że rozpoczęła się nieodwracalne zmiany strukturalne, włókna wykazują utratę elastyczności. W fazie „przebarwiania włókien” znajduje się znacząca część włókien w objętości próbki.



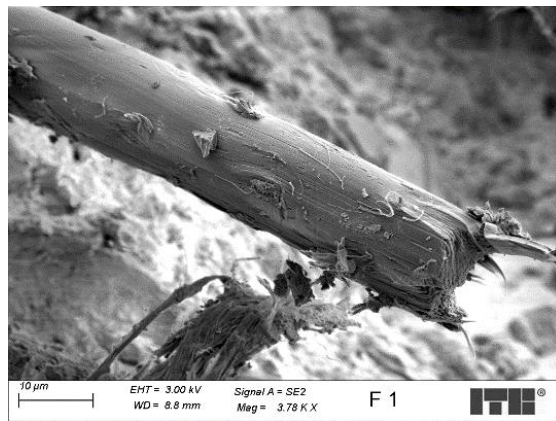
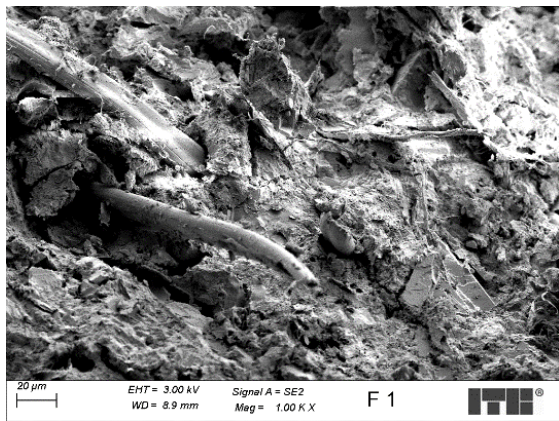
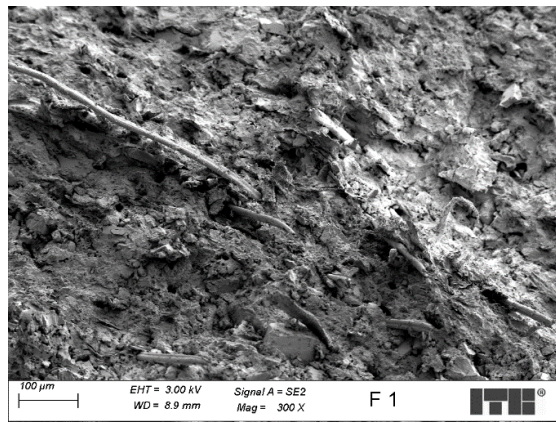
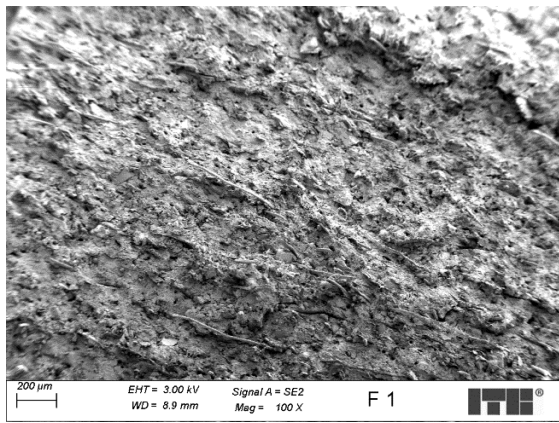
**Rys. 5.91.** Przelam próbki F5 z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego

Kolejno badaniu poddano próbkę o oznaczeniu F2. Zlokalizowana była ona centralnie nad paleniskiem na wysokości około 1,2 m powyżej terenu. Obraz z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego przedstawiono na rysunku 5.92. Próbka charakteryzuje się pojedynczymi włóknami, które zaczęły się przebarwiać, uzyskując kolor brązowy (pozostałe zostają w swoim naturalnym kolorze). Temperatura wskazana na termoparach w lokalizacji próbki F5 maksymalnie wynosiła około 390°C, co spowodowało rozpoczęcie destrukcji włókien. W przypadku próbki F2 temperatura maksymalna wynosiła około 190°C – destrukcja (w tym „przebarwienie włókien”) rozpoczęła się, lecz stanowi małą ich część w objętości próbki. Należy wskazać znaczące różnice w kolorystyce włókien pomiędzy próbkami poddanymi oddziaływaniu pożarem, a próbką referencyjną (rysunek 5.89), która posiada włókno o kolorystyce naturalnej, zbliżonej do białej.



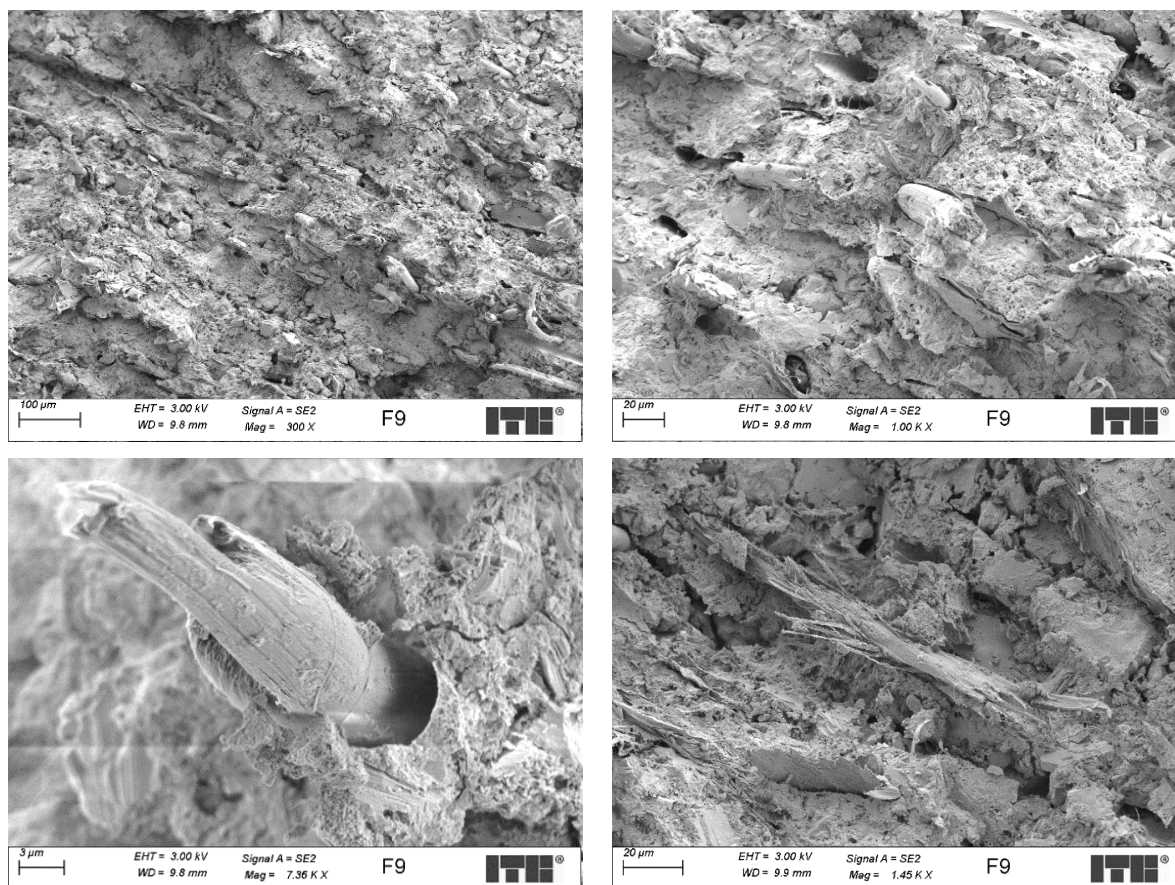
**Rys. 5.92.** Przełam próbki F2 z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego

Następnie badaniu z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego poddano próbki o oznaczeniu F1 (ta sama lokalizacja co w przypadku próbek F2). Pozwoliło to na zobrazowanie sposobu niszczenia próbki – poprzez zerwanie włókien, przedstawiono to na rysunku 5.93. Zniszczenie poprzez zerwanie włókna wskazuje, iż są one słabszym elementem. Taki rodzaj zniszczenia jest charakterystyczny dla próbek, które zostały poddane oddziaływaniu wysokimi temperaturami oraz wykazują początkowe nieodwracalne zmiany, np. poprzez efekt „przebarwiania” włókien.



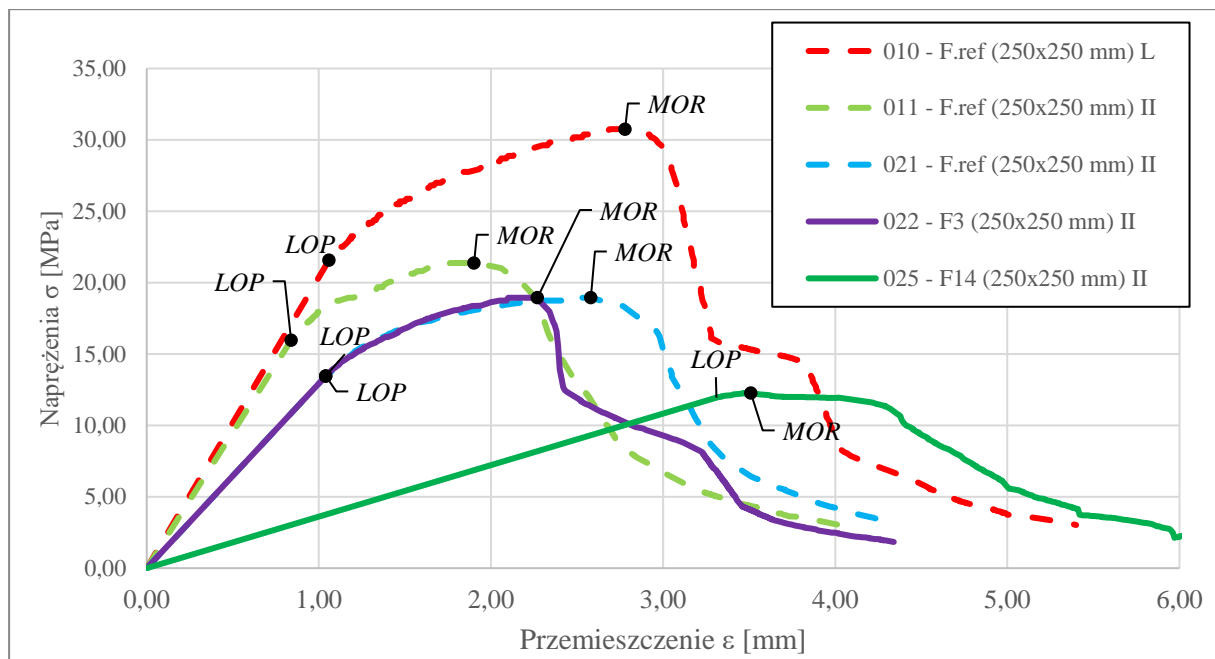
**Rys. 5.93.** Przełam próbki F1 z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego

Ostatnią próbką poddaną analizie była próbka F9, która znajdowała się w bezpośredniej lokalizacji źródła ognia (drewnianych belek). Analiza próbki z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego została przedstawiona na rysunku 5.94. Charakteryzuje się ona zniszczeniem włókien poprzez zerwanie. Ponadto, zauważalne jest, iż część włókien uległa pirolizie – wskazuje to na bardziej krytyczną sytuację aniżeli ta, która wystąpiła w próbkach F1 i F2.

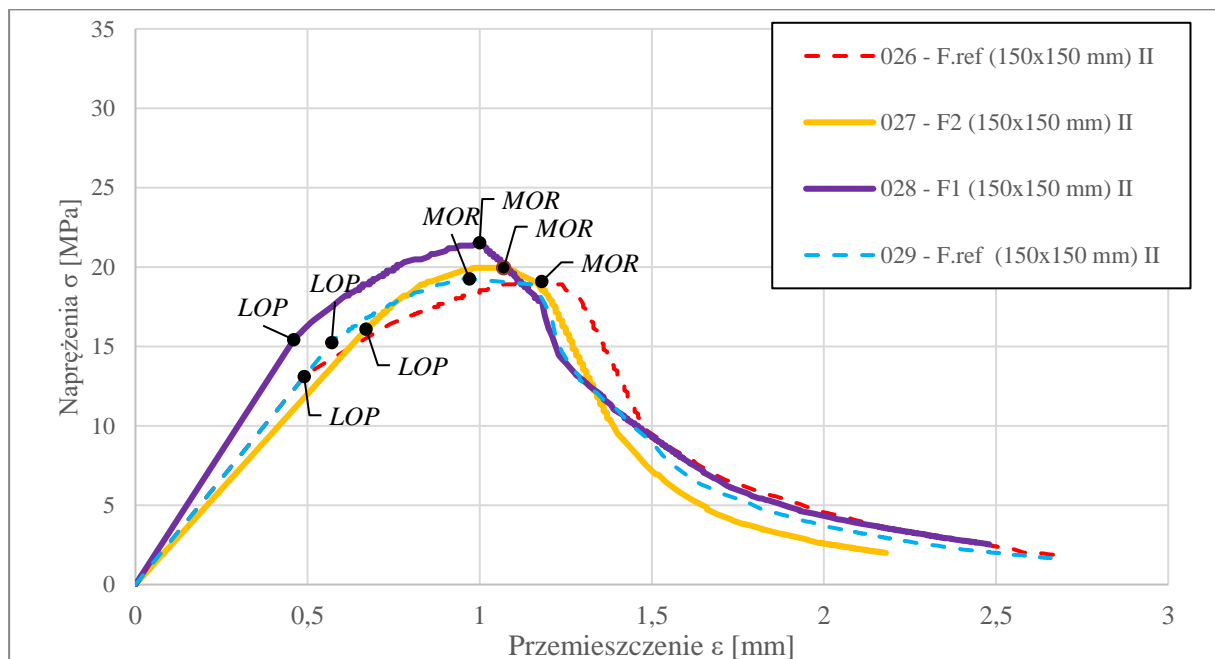


**Rys. 5.94.** Przełam próbki F9 z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego

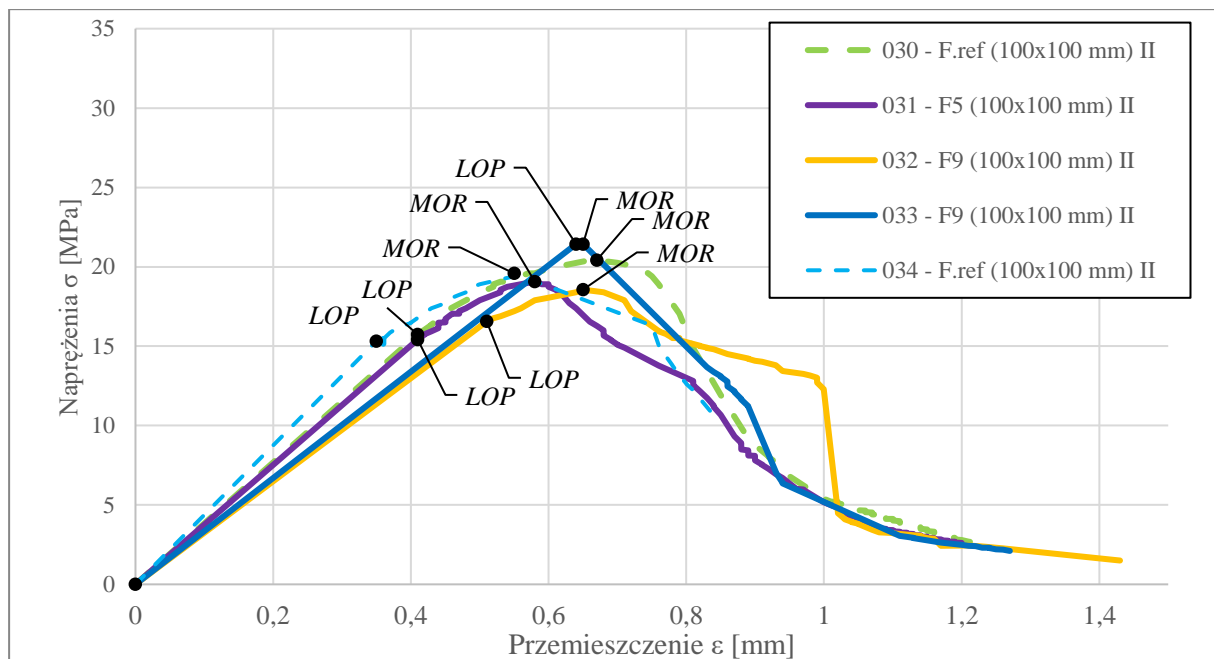
Badaniom poddano łącznie 7 próbek pobranych z modelu serii F poddanego oddziaływaniu pożarem: F3, F14 o gabarytach 250 × 250 mm, F1, F2 o gabarytach 200 × 200 mm, F5 oraz 2 × F9 o gabarytach 100 × 100 mm. Wyniki przedstawiono kolejno na wykresach: 5.42, 5.43 i 5.44. Próbka F14 która wykazuje największe straty wytrzymałości ma nienaturalny przebieg wykresu - wykres nachylony jest do osi X pod małym kątem. Prawdopodobnie jest to spowodowane mechanicznym uszkodzeniem próbki. Próbkę F14 odrzucono i nie poddano dalszym analizom. Wykresy próbek referencyjnych oraz próbek poddanych oddziaływaniu pożarem wykazują podobny przebieg. Próbki wykazują, iż temperatury panujące w badaniu nie spowodowały większych zniszczeń aniżeli „nieistotna destrukcja”, lecz zaszły w nich nieodwracalne zmiany poprzez „przebarwienie” włókien, co stanowi pierwszą fazę wskazującą przejście do istotnej destrukcji.



**Wykres 5.42.** Przebieg badania wytrzymałości na zginanie zgodnie z pkt. 4.4 dla próbek pobranych z modelu wielkoskalowego serii badań F – cz. 1.



**Wykres 5.43.** Przebieg badania wytrzymałości na zginanie zgodnie z pkt. 4.4 dla próbek pobranych z modelu wielkoskalowego serii badań F – cz. 2.



**Wykres 5.44.** Przebieg badania wytrzymałości na zginanie zgodnie z pkt. 4.4 dla próbek pobranych z modelu wielkoskalowego serii badań F – cz. 3.

Wyniki z powyższych wykresów przedstawiono również w tabeli 5.7. Istotną destrukcję wskazano na próbkach 022 – F3 oraz 025 – F14. Próbka 022 – F3 ma właściwy przebieg wykresu wytrzymałości. Wytrzymałość na zginanie *MOR* próbki poddanej oddziaływaniu pożarem wynosi 94% próbki referencyjnej i mieści się w zakresie granicy błędu pomiaru. Wartość pracy łamania dla tej próbki wynosi 81,0% próbki referencyjnej i jest to parametr przypisujący stan próbki do istotnej destrukcji. Wpływ na wartość pracy łamania ma przebieg zakresu plastycznego próbki. Taki przebieg strefy plastycznej jest możliwy, tym bardziej iż próbki zlokalizowane w miejscach bardziej narażonych na wysokie temperatury (F1 i F2) wykazują nieistotną destrukcję z widocznymi fazami „przebarwiania włókien”. Z uwagi na powyższe, stopień destrukcji próbki F3 skorygowano z istotnej destrukcji na destrukcję nieistotną która rzeczywiście występuje w tej próbce.

Próbka o oznaczeniu 025 – F14 prawdopodobnie początkowo posiadała wstępne uszkodzenia, stąd też takie niskie parametry wytrzymałościowe i płaski przebieg wykresu wytrzymałości. Tak samo jak w przypadku powyższej próbki, próbki w strefach bardziej narażonych na wysokie temperatury (F1 i F2) wykazują mniejszy zakres destrukcji. Próbkę odrzucono ze zbioru.

**Tabela 5.7.** Oznaczenie stopnia destrukcji próbek z serii badań F

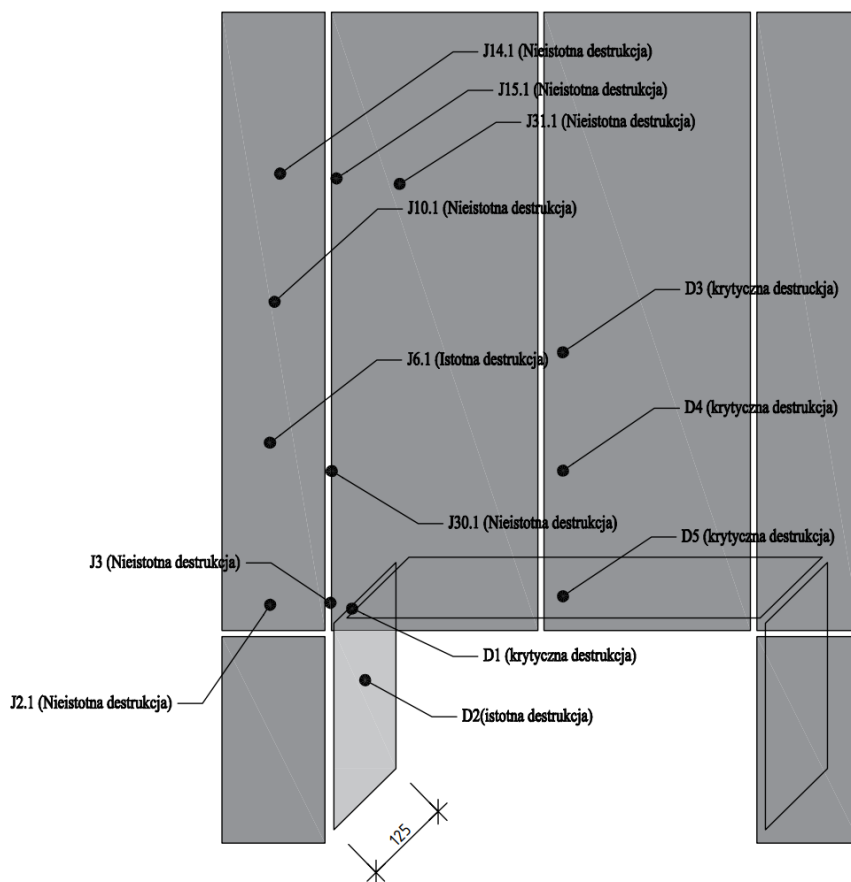
Oznaczenie Próbki	MOR	Wartość średnia MOR próbki ref.	[%] wartość	LOP	Wartość średnia LOP próbki ref.	[%] wartość	ED	Wartość średnia ED próbki ref.	[%] wartość	$1/\int_{F_0}^{0,4F_{max}} F dx$	Wartość średnia W <sub>f</sub> próbki ref.	[%] wartość	Stopień destrukcji
	MPa			MPa			GPa						
022 - F3 (250x250 mm) II	18,94	20,16	94,0%	13,46	14,71	91,5%	10,79	13,32	81,0%	1041,9	2167,5	48,1%	Istotna destrukcja
025 - F14 (250x250 mm) II	12,26		60,8%	11,94		81,2%	3,01		22,6%	1021,9		47,1%	Istotna destrukcja
027 - F2 (150x150 mm) II	19,95	19,17	104,1%	16,08	14,16	113,6%	6,27	6,98	89,9%	886,3	968,1	91,6%	Nieistotna destrukcja
028 - F1 (150x150 mm) II	21,53		112,3%	15,42		108,9%	8,76		125,5%	1042,3		107,7%	Nieistotna destrukcja
031 - F5 (100x100 mm) II	19,07	20,00	95,4%	15,41	15,53	99,3%	4,05	4,44	91,5%	796,9	853,8	93,3%	Nieistotna destrukcja
032 - F9 (100x100 mm) II	18,56		92,8%	16,57		106,7%	3,50		79,1%	906,4		106,2%	Nieistotna destrukcja
033 - F9 (100x100 mm) II	21,43		107,2%	21,43		138,0%	3,61		81,5%	813,6		95,3%	Nieistotna destrukcja



## 5.2.4 Podsumowanie badań na próbkach

W punktach 5.2.1 – 5.2.3 przedstawiono wyniki badań próbek płyt włóknisto-cementowych: referencyjnych oraz poddanych oddziaływaniem pożaru pozyskanych z modeli wielkoskalowych. Ponadto zinterpretowano uzyskane wyniki z badań oraz wykonano opis zniszczenie płyt włóknisto-cementowych w zakresie fazy matrycy cementowej i fazy rozproszonej po oddziaływaniu pożarem na modelach wielkoskalowych. Poniżej podsumowano wyniki badań na próbkach dla wszystkich serii.

Zauważalne są znaczące różnice pomiędzy badaniami wszystkich serii opisanymi powyżej. Szczególnie duże różnice w zakresie stopnia destrukcji próbek są pomiędzy badaniami na modelach rzeczywistych i na budynku modelowym. Dla modelu rzeczywistego serii D i J przedstawiono opracowanie wykazujące stopień destrukcji dla pobranych próbek w zależności od lokalizacji ich pozyskania (rysunek 5.95). Do krytycznej destrukcji należy przepisać w całości glify oraz strefę pióropusza, dalsze strefy są strefami objętymi głównie przez nieistotną destrukcję. Bardzo trudne do wskazania na modelu rzeczywistym jest miejsce występowania istotnej destrukcji. W powyższych badaniach wykazano, iż istotna destrukcja w warunkach rzeczywistego pożaru niemalże nie występuje.



Rys. 5.95. Lokalizacja pobranych próbek dla serii badań D i J

Ważne jest także to, że wyniki istotnej i krytycznej destrukcji okładziny elewacyjnej są powiązane z destrukcją podkonstrukcji oraz elementami odpadającymi z elewacji, w tym okładzinami. Istotna oraz krytyczna destrukcja są funkcją czasu i występują tylko po przekroczeniu krytycznych temperatur. Zniszczenie włókien występuje przede wszystkim po przekroczeniu krytycznej dla nich temperatury, a w przypadku matrycy cementowej kluczowym elementem jest funkcja czasu i temperatury. Krótkie oddziaływanie wysokimi temperaturami na matrycę cementową, w przeciwieństwie do włókien, nie powoduje natychmiastowej destrukcji.

Jak wskazują wyniki serii F temperatury osiągające około 400°C (próbka F5) oraz wyższe (próbka F9) powodują nieodwracalne zmiany wewnątrz struktury płyt włóknisto-cementowych. Taka temperatura powoduje „przebarwienie” się włókien na brązowo, co wskazuje na utratę właściwości elastycznych i poprzedzają pirolizę. Temperatury oddziaływujące na próbki F1 i F2, będące na wysokości ok. 1,2 m nad poziomem terenu osiągnęły wartość 290°C, spowodowało to pojedyncze przebarwienie się włókien na kolor brązowy (występował efekt „przebarwiana” włókien). Efekty te pokrywają się również z badaniami na modelu rzeczywistym serii D, gdzie próbka o oznaczeniu D3 wykazywała maksymalne temperatury ok. 400°C i były one również krytyczne.

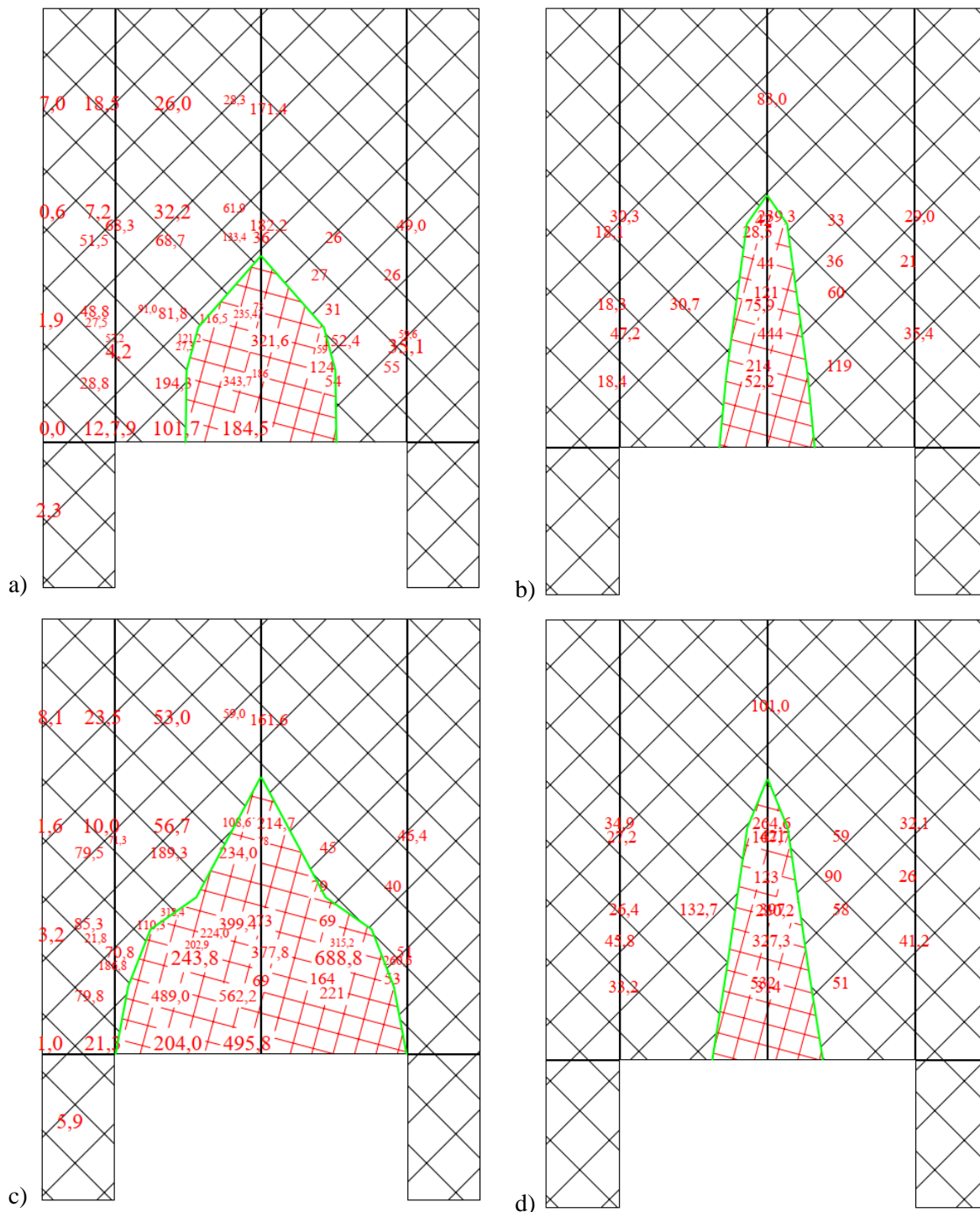
### **5.3 Globalne mapy destrukcji modelu rzeczywistego**

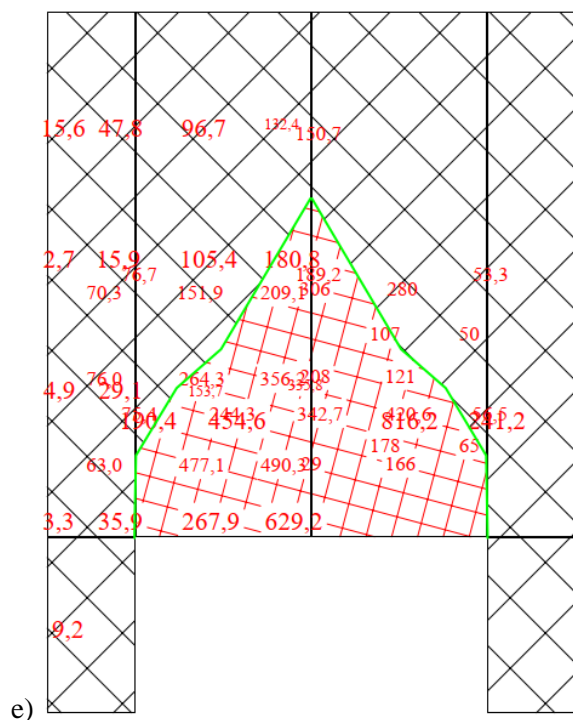
W niniejszym rozdziale opracowano globalne mapy destrukcji na podstawie globalnych map temperatur (przedstawionych w rozdziale 5.1.13), uwzględniając przebieg badań na modelach rzeczywistych (rozdziały 5.1.1 – 5.1.5 i 5.1.8 – 5.1.10) oraz analizę destrukcji płyt w badaniach lokalnych (rozdział 5.2). Wszystkie próbki przyjęte do zrealizowania globalnych map destrukcji przedstawiono w formie tabelarycznej (tabela 5.8). Próbki pobrane z serii badań D wykazują wysoki stopień destrukcji z uwagi na miejsce ich pobrania - obręb pióropusza, w którym występowały płomienie. Próbki z serii płyt J wykazują niższy stopień destrukcji z uwagi na miejsca ich pobrania pozyskane z elementów ościennych modelu. Tabelę opisującą stopień destrukcji przedstawiono również w formie graficznej na rysunku 5.94, gdzie jedyną próbką z serii J wykazującą inną aniżeli „nieistotną destrukcję” jest próbka J6, gdzie zgodnie z tabelą 5.5 – kluczowym parametrem przypisującym próbkę J6 do „istotnej destrukcji” była praca łamania (2% poniżej granicy). Z uwagi, iż przebieg wyników z wykresu dla próbki J6 jest właściwy (wykres 5.39) i charakterystyczny dla płyt włóknisto-cementowych z niską wytrzymałością na zginanie *MOR* oraz krótką strefą plastyczną, skorygowano przypisanie próbki do „destrukcji nieistotnej”.

Tabela 5.8. Oznaczenie stopnia destrukcji próbek z serii badań D, J, F

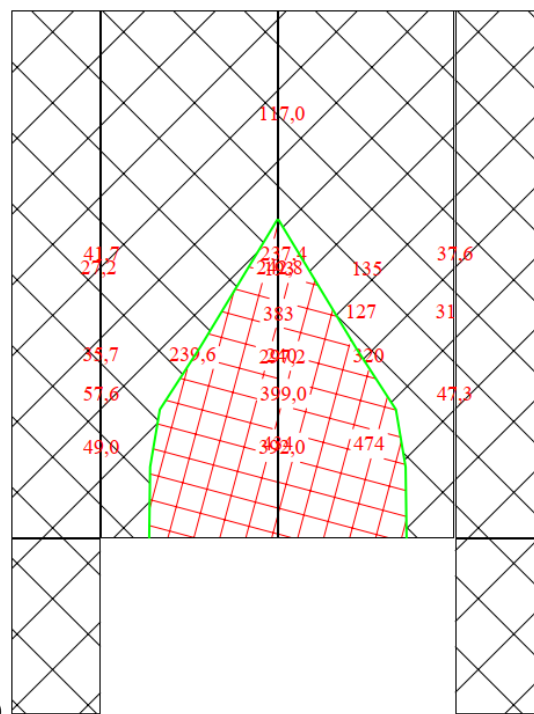
Oznaczenie Próbki	MOR	Wartość średnia MOR próbki ref.	[%] wartość	LOP	Wartość średnia LOP próbki ref.	[%] wartość	ED	Wartość średnia ED próbki ref.	[%] wartość	W <sub>f</sub>	Wartość średnia W <sub>f</sub> próbki ref.	[%] wartość	Stopień destrukcji
	MPa			MPa			GPa			$1/\int_{F_0}^{0,4F_{max}} F dx$			
014 – D2 (150x150 mm) L	27,88	32,38	86,1%	24,44	29,75	82,2%	14,35	11,50	124,7%	488,0	1135,80	42,97%	Istotna destrukcja
015 – D3 (150x150 mm) L	6,20		19,1%	4,53		15,2%	1,43		12,4%	301,7		26,57%	Krytyczna destrukcja
016 – D3 (75x145 mm) II	9,45	21,74	43,5%	9,45	21,74	43,5%	8,10	12,84	63,1%	71,7	408,33	17,55%	Krytyczna destrukcja
017 – D1 (120x130 mm) II	12,62	25,52	49,5%	12,62	25,10	50,3%	5,57	7,48	74,4%	179,3	758,13	23,65%	Krytyczna destrukcja
018 – D4 (100x100 mm) II	3,86		15,1%	3,61		14,4%	1,63		21,7%	67,5		8,91%	Krytyczna destrukcja
019 – D4 (100x100 mm) II	10,26		40,2%	10,26		40,9%	2,70		36,0%	159,5		21,04%	Krytyczna destrukcja
020 – D5 (100x100 mm) II	1,45		5,7%	1,45		5,8%	0,50		6,7%	28,1		3,71%	Krytyczna destrukcja
045 – j15.1 (250x250 mm) II	16,78	22,13	75,8%	16,18	20,53	78,8%	14,04	18,01	78,0%	678,8	778,35	87,2%	Nieistotna destrukcja
047 – J10.1 (250x250 mm) II	17,29		78,1%	16,11		78,4%	9,90		55,0%	693,9		89,2%	Nieistotna destrukcja
048 – J14.1 (250x250 mm) II	18,11		81,9%	16,09		78,4%	14,74		81,9%	666,5		85,6%	Nieistotna destrukcja
049 – J3 (250x250 mm) II	16,59		75,0%	13,76		67,0%	10,30		57,2%	979,8		125,9%	Nieistotna destrukcja
050 – J6.1 (250x250 mm) II	19,31		87,3%	19,31		94,1%	15,42		85,6%	606,8		78,0%	Istotna destrukcja Nieistotna destrukcja
051 - J31.1 (250x250 mm) II	25,50		115,3%	20,44		99,5%	10,85		60,2%	2017,0		259,1%	Nieistotna destrukcja
055 - J30.1 (200x200 mm) II	17,23	17,04	101,1%	14,87	17,04	87,2%	9,49	14,27	66,5%	231,3	225,63	102,5%	Nieistotna destrukcja
056 - J2.1 (200x200 mm) II	18,69		109,7%	18,69		109,7%	8,45		59,2%	250,6		111,1%	Nieistotna destrukcja

Analizując uzyskane wyniki oraz nakładając je w funkcji czasu na podstawie globalnych map temperatur 5.1.13, wyznaczono globalne mapy destrukcji wskazujące istotną oraz krytyczną destrukcję w kolejnych fazach pożaru w podziale na powierzchnię oraz przestrzeń wentylacyjną. Przedstawiono je na rysunku 5.96.

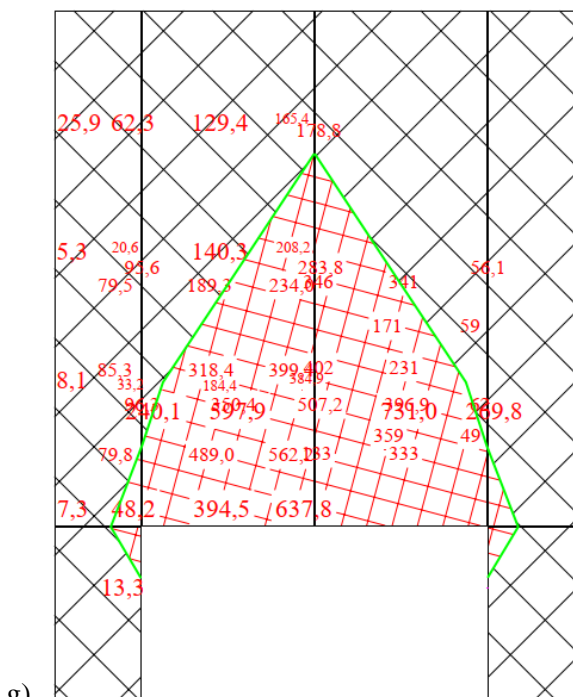




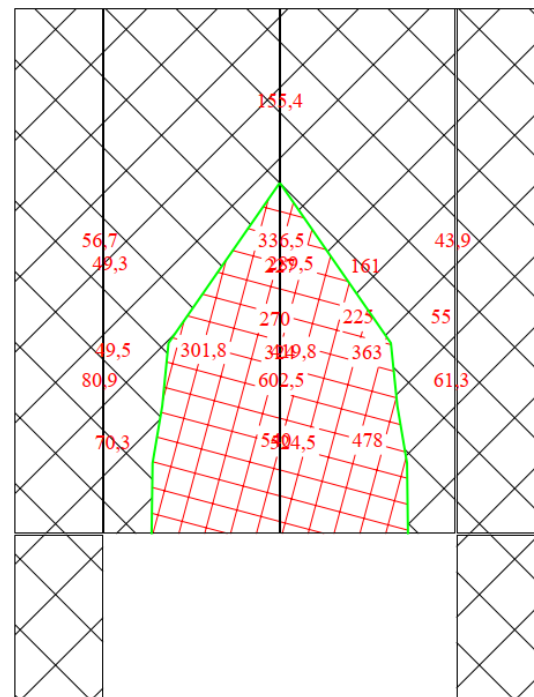
e)



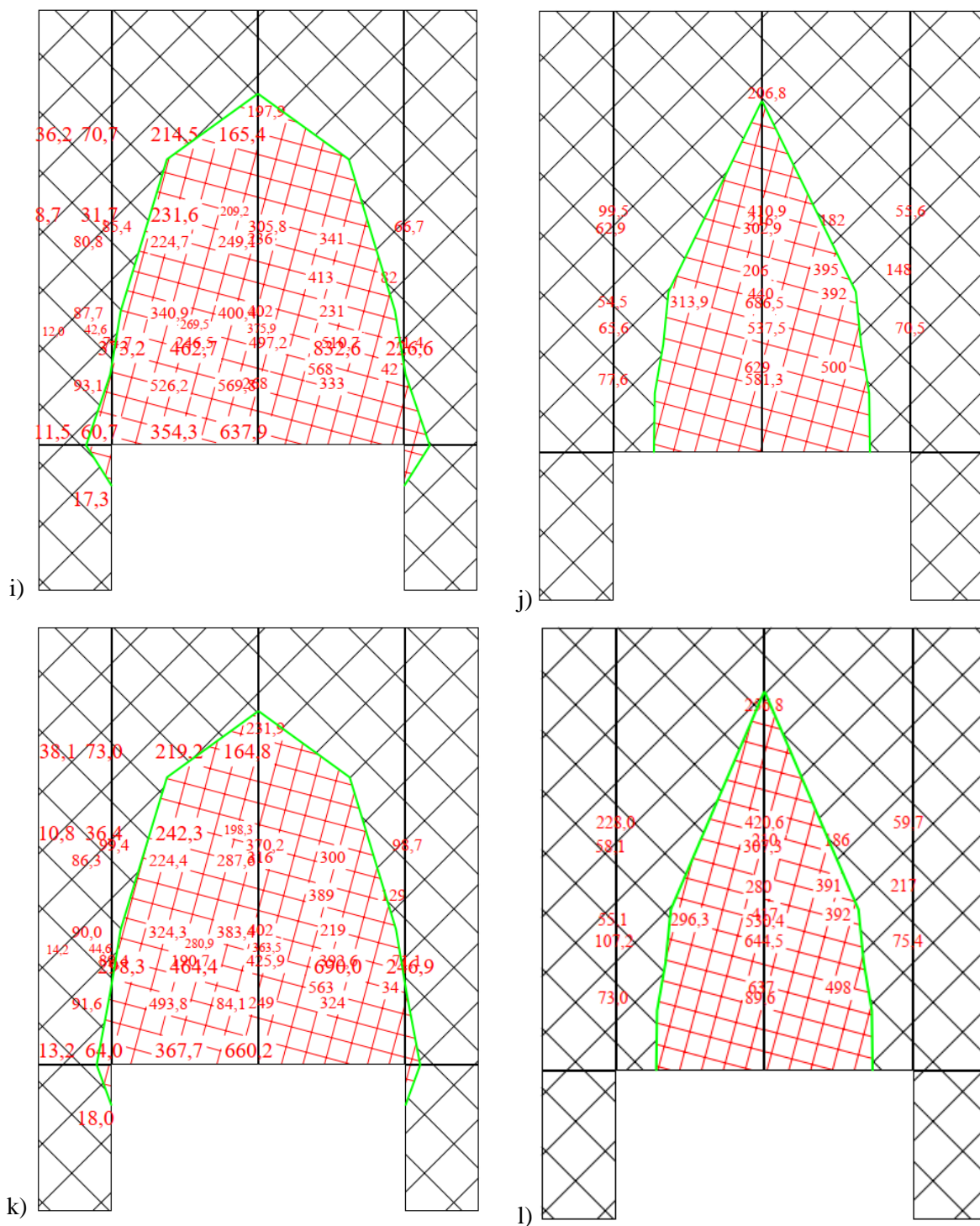
f)



g)



h)



**Rys. 5.96.** Globalne mapy destrukcji w podziale na powierzchni okładzin i w przestrzeni wentylacyjnej: a) 1'00" – na powierzchni okładzin; b) 1'00" – w przestrzeni wentylacyjnej ; c) 5'00" – na powierzchni okładzin; d) 5'00" – w przestrzeni wentylacyjnej ; e) 10'00" – na powierzchni okładzin; f) 10'00" – w przestrzeni wentylacyjnej; g) 20'00" – na powierzchni okładzin; h) 20'00" – w przestrzeni wentylacyjnej; i) 40'00" – na powierzchni okładzin; j) 40'00" – w przestrzeni went.; k) 60'00" – na powierzchni okładzin; l) 60'00" – w przestrzeni wentylacyjnej

Należy zauważyć, iż destrukcja w przestrzeni wentylacyjnej z początkowej „wąskiej” przeistacza się z czasem w „szeroką”, obejmującą niemalże cały zakres płyt włóknisto-cementowych na szerokości paleniska. Spowodowane jest to wytopieniem wełny z przestrzeni wentylacyjnej wraz z czasem trwania i postępowaniem pożaru. Konsekwencjami wytopienia wełny jest ograniczanie efektu ciągu kominowego, co umożliwia normalny rozwój pióropusza również wewnątrz przestrzeni wentylacyjnej.

## 6. IDENTYFIKACJA MODELU ZNISZCZENIA ELEWACJI WENTYLOWANEJ Z OKŁADZINĄ Z PŁYT WŁÓKNISTO-CEMENTOWYCH POD WPLYWEM ODDZIAŁYWANIA POŻARU

Praca jest kontynuacją i rozwinięciem tematyki w zakresie destrukcji płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania wysokimi temperaturami, którą poruszał dr inż. Mateusz Szymków w rozprawie doktorskiej [161] pod opieką promotora prof. dr. hab. inż. Krzysztofa Schabowicza. Szymków w pracy [161] zaproponował metodę oceny stopnia destrukcji dla próbek płyt włóknisto-cementowych poddanych oddziaływaniu wysokimi temperaturami (230°C i 400°C).

Na potrzeby niniejszej rozprawy zaadaptowane i zmodyfikowane zostało rozwiązanie wykorzystywane w laboratoriach notyfikowanych w Polsce, w tym w Instytucie Techniki Budowlanej, a mianowicie badanie na modelach rzeczywistych elewacji, które są stosowane do oceny elewacji wentylowanych, m.in. w zakresie zgodności z par. 225 Rozporządzenia w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [132], tj.: „Elementy okładzin elewacyjnych powinny być mocowane do konstrukcji budynku w sposób uniemożliwiający ich odpadanie w przypadku pożaru w czasie krótszym niż wynikający z wymaganej klasy odporności ogniowej dla ściany zewnętrznej”.

Wykonując badania własne na modelach wielkoskalowych: modelach rzeczywistych elewacji wentylowanych i budynkach modelowych, poddanych oddziaływaniu pożarem i wykorzystując termopary mierzące przebieg temperatury, opracowano schematy przedstawiające rozkład temperatur na powierzchni okładzin elewacyjnych oraz w przestrzeni wentylacyjnej, tzw. lokalne mapy temperatur.

Na podstawie lokalnych map temperatur, przedstawiających temperatury dla jednego badania, opracowano globalne mapy temperatur przedstawiające wyniki dla zbioru modeli rzeczywistych przeanalizowanych w pracy.

Kolejnym krokiem było pozyskanie próbek referencyjnych i próbek pozyskanych z modeli wielkoskalowych poddanych oddziaływaniu pożarem, celem określenia odpowiedniego stopnia destrukcji.

W niniejszej pracy do oceny stopnia destrukcji płyt włóknisto-cementowych wykorzystano kryteria oraz główne założenia metody opracowanej przez Szymkowską [161]. Metodyka analizy otrzymanych wyników odbywa na podstawie wytrzymałości na zginanie  $MOR$  oraz pracy łamania  $W_f$ . Wykorzystując powyższe dwa parametry ocenia się stopień destrukcji próbki przypisując ją do jednego z trzech stadiów: nieistotna destrukcja, istotna destrukcja, krytyczna destrukcja. Nieistotna destrukcja charakteryzuje się spełnieniem następujących warunków: praca łamania  $W_f$ :  $U_L > 0,85$ , wytrzymałość na zginanie  $MOR$ :  $R_L > 0,75$ . Istotna destrukcja charakteryzuje się spełnieniem następujących warunków: praca łamania  $W_f$ :  $U_L < 0,85$ ; wytrzymałość na zginanie  $MOR$ :  $R_L > 0,75$ . Krytyczna destrukcja charakteryzuje się niespełnieniem warunku wytrzymałości na zginanie  $MOR$ :  $R_L > 0,75$ .



Następnie wykorzystując autorską metodę określono pozostałe parametry tj. granicę proporcjonalności  $LOP$  i wartości modułu Younga  $E_D$  oraz dokonano analizy wykresów w zakresie wytrzymałość na zginanie i zweryfikowano czy są one zbieżne z określonym stopniem destrukcji, ostatecznie akceptując lub zmieniające wcześniej przypisany stopień destrukcji. Po przypisania właściwego stopnia destrukcji odpowiednim próbkom poddanych oddziaływaniu pożaru można było zrealizować cel jakim była identyfikacji modelu zniszczenia elewacji wentylowanej o okładzinach z płyt włóknisto-cementowych.

Przypisanie odpowiedniego stopnia destrukcji próbkom poddanych oddziaływaniu pożaru i odpowiednie zlokalizowanie ich na planie modelu rzeczywistego umożliwiło utworzenie globalnych mapy destrukcji przedstawiające wyniki dla zbioru badań.

Globalne mapy destrukcji wskazują strefę krytyczną materiału kompozytowego, jakim są płyty włóknisto-cementowe. Strefa krytyczna wyznacza obszar okładzin zewnętrznych całkowicie pozbawionych wytrzymałości na zginanie. Jednocześnie wykazuje ona największe zagrożenie odpadaniem elementów okładzin elewacyjnych. W zakresie terminologii wprowadzonej do nauki w pracy [161] strefa krytyczna wykazuje istotną i krytyczną destrukcję. Strefa krytyczna została wyznaczona na podstawie temperatur występujących na globalnych mapach i badań na próbkach pozyskanych z modeli wielkoskalowych poddanych oddziaływaniu pożarem.

Wcześniejsze kroki, tzn. analiza przebiegu badań na modelach wielkoskalowych z rozpoznaniem globalnego zjawiska destrukcji okładzin elewacyjnych, opracowanie map temperatur, badania „lokalne” na próbkach oraz opracowanie globalnych map destrukcji pozwoliło na zidentyfikowanie modelu zniszczenia płyt włóknisto-cementowych stosowanych w elewacjach wentylowanych pod wpływem oddziaływania pożaru. Model zniszczenia dla fazy rozproszonej podczas oddziaływania pożarem wygląda następująco – już przy temperaturze około 200°C (przykład próbki F2) występuje zjawisko tzw. „przebarwiania włókien”, pierwsze włókna przybierają kolorystkę odcieni brązu, co początkuje fazę utraty ich elastyczności oraz zwiększonej kruchości, lecz wpływ na całości próbki jest minimalny (tylko pojedyncze włókna wykazują utratę elastyczności). Już taka temperatura wpływa na zmiany w przebiegu wytrzymałości na zginania, tzn. próbka po przejściu przez punkt wytrzymałości na zginanie  $MOR$  charakteryzuje się dużo gorszym przebiegiem strefy plastycznej, co w konsekwencji przekłada się na mniejszą pracę łamania  $W_f$ . Przy temperaturze około 400°C (przykład próbki F5) we wszystkich włóknach występuje efekt „przebarwiania włókien”, widoczna jest znaczna utrata ich elastyczności oraz zwiększona kruchości. Pogorszenie parametrów wytrzymałościowych próbki przy oddziaływaniu temperaturą około 400°C jest jeszcze bardziej widoczne, ponadto przebieg wykresu w tzw. „stanie plastycznym”, po przekroczeniu punktu wytrzymałości na zginanie  $MOR$ , prawie nie występuje. Krytyczne dla włókien jest utrzymanie temperatury (około 400°C) przez kilka minut – włókna ulegają wówczas całkowitej pirolizie. W przypadku fazy rozproszonej w zakresie jej

destrukcji istotniejsze jest osiągnięcie krytycznej temperatury aniżeli czas oddziaływania temperaturą krytyczną oraz funkcja czasu i temperatury.

W przypadku fazy osnowy, matrycy cementowej, model zniszczenia przedstawia się w inny sposób, tzn. krytyczny dla tej fazy jest czas oddziaływania wysokimi temperaturami, a wtórnym jest wartość temperatury. Matryca cementowa jest w stanie wytrzymać oddziaływanie wysokimi temperaturami przez krótki czas oddziaływania bez wpływu na jej wytrzymałość. W przypadku matrycy cementowej temperatury około 300°C powodują mikropęknięcia struktury matrycy przy oddziaływaniu przez kilka minut. Oddziaływanie takimi temperaturami przez około 20 minut (np. w przypadku glifu modelu serii płyt D) jest krytyczne dla fazy osnowy i wyczerpuje jej nośność. Temperatura około 400°C w czasie około 10 minut powoduje krytyczne lub istotne zniszczenie matrycy cementowej.

Należy również wskazać, iż w przypadku próbek referencyjnych model zniszczenia próbek wygląda tak, że następuje wyciągnięcie włókien lub ich zerwanie, gdzie w przypadku próbek poddanych oddziaływaniu pożarem znacznie mocniejszym elementem jest faza osnowy i zniszczenie odbywa się głównie poprzez zerwanie włókien.

Wobec powyższych w matrycy cementowej wcześniej zauważalne są efekty wysokich temperatur poprzez mikropęknięcia spowodowane rozszerzalnością cieplną, lecz to w fazie rozproszonej wcześniej następuje utrata całkowita nośności. Ponadto, co ważne, nie sposób określić różnic temperaturowych powodujących istotną i krytyczną destrukcję, przejście z istotnej w krytyczną destrukcję wynika z czasu oddziaływania na element i niemożliwe staje się określenie jej realnego czasu.

Nieistotną destrukcję charakteryzuje pojawienie się pierwszych włókien, które ulegają „przebarwieniu”. Stan przejścia z nieistotnej w istotną destrukcję charakteryzuje się „przebarwianiem” większości włókien, czyli zmianami strukturalnymi, które to mają znaczący wpływ na przebieg wytrzymałości na zginanie, szczególnie po przekroczeniu punktu wytrzymałości na zginanie *MOR*, czyli w tzw. części plastycznej. Krytyczna destrukcja charakteryzuje się zjawiskiem całkowitej pirolizy włókien.

W nawiązaniu do powyższej analizy teza 1, przedstawiona w pkt. 2.4: *Identyfikacja modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych jest możliwa na podstawie badań na modelach wielkoskalowych* została potwierdzona, zidentyfikowano i opisano model zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożaru na podstawie badań na modelach wielkoskalowych.

## 7. IDENTYFIKACJA GLOBALNEGO PROBLEMU ODPADANIA ELEMENTÓW OKŁADZIN ELEWACYJNYCH W WARUNKACH ODDZIAŁYWANIA POŻARU

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (WT) [132] wskazuje wymagania w par. 225 WT: „Elementy okładzin elewacyjnych powinny być mocowane do konstrukcji budynku w sposób uniemożliwiający ich odpadanie w przypadku pożaru w czasie krótszym niż wynikający z wymaganej klasy odporności ogniowej dla ściany zewnętrznej”. Odpadanie elementów elewacji wentylowanych, w tym okładzin zewnętrznych wykonanych z płyt włóknisto-cementowych w warunkach pożaru spowodowane jest ich destrukcją w warunkach wysokiej temperatury. Jak przedstawiono w opisie przebiegu badań na modelach rzeczywistych (pkt. 5.1.1 – 5.1.10) w przypadku okładziny elewacyjnej wykonanej z płyt włóknisto-cementowych zawsze występowała problematyka odpadania elementów okładzin elewacyjnych.

Wobec tego teza 2, przedstawiona w pkt. 2.4: *Obecnie na rynku materiałów budowlanych, nie są dostępne płyty włóknisto-cementowe, które to spełnią wymagania „nieodpadania elementów okładzin w warunkach pożaru” w rozumieniu par. 225 warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* została potwierdzona. Wykazano, że płyty włóknisto-cementowe nie spełniają obecnie wymagania „nieodpadania elementów okładzin w warunkach pożaru” w rozumieniu par. 225 WT [132].

Bardzo istotnym punktem w zakresie zwiększenia bezpieczeństwa elewacji wentylowanej oraz ograniczenia odpadania elementów okładzin w warunkach pożaru jest odpowiednie zaprojektowanie i wykonanie glifów. Wykonywanie glifów z elementów okładzin elewacyjnych, zwiększa niebezpieczeństwo zniszczenia ich przez wysokie temperatury i dostanie się płomieni wewnątrz przestrzeni wentylacyjnej. Zastosowanie elementów stalowych jako glifu w znaczący sposób może ograniczyć dostęp płomieni do przestrzeni wentylacyjnej z uwagi, iż płomienie nie mogą pokonać w większości przypadków tej bariery. Rozwój pożaru w przestrzeni wentylacyjnej po wytopieniu wełny powoduje ograniczenie efektu kominowego, co jest bardzo niebezpiecznym zjawiskiem. Umożliwia to dostęp wysokich temperatur oraz płomieni do odsłoniętej konstrukcji i strony wewnętrznej okładziny elewacyjnej. Wysokie temperatury w przestrzeni wentylacyjnej powodują częste odpadanie w całości elementów okładzin elewacyjnych. W przypadku oddziaływania płomieni wyłącznie na powierzchni zewnętrznej okładzin takie ryzyko jest znacznie niższe. Ponadto, wysokie temperatury powodują znaczną rozszerzalność wszystkich materiałów, a to kolejno może doprowadzić do ścięcia połączeń mechanicznych, które znajdują się w obrębie przestrzeni wentylacyjnej.

Kolejnym aspektem zwiększającym bezpieczeństwo elewacji wentylowanej, lecz nie eliminującym problemu „odpadania elementów okładzin elewacyjnych”, jest stosowanie

odpowiedniego rodzaju montażu okładzin. Najbezpieczniejszym rodzajem kotwienia okładzin elewacyjnych są połączenia łączone montaż adhezyjny i mechaniczny, na całej powierzchni paneli w strefie pióropusza. Istotnym jest, ażeby zastosowane łączniki mechaniczne były na całej powierzchni płyty, a nie tylko w pojedynczym rzędzie. Łączniki mechaniczne zapewniają główną nośność okładziny elewacyjnej, a kleje ograniczają odpadanie w duży elementach zagrażających zdrowiu bądź życiu ludzi w przypadku wystąpienia oddziaływania pożarem.

Należy zwrócić uwagę, iż płyty włóknisto-cementowe tak, jak i inne materiały stosowane jako okładziny elewacyjne i przeanalizowane w pracy w pkt. 5.1.1 – 5.1.10 m.in. okładziny ceramiczne, płyty HPL, charakteryzują się występowaniem odpadania elementów okładzin elewacyjnych. Jednak w przypadku prawidłowo rozwiązanego glifu – opisanego powyżej i dobrze zaprojektowanego systemu montażu, płyty włóknisto-cementowe odpadają w niewielkich dopuszczalnych elementach, czego nie można przypisać innym materiałom, w tym okładzinom ceramicznym. Wobec powyższego można stwierdzić, iż płyty włóknisto-cementowe są „względnie” bezpiecznym materiałem do stosowania jako okładziny elewacyjne z materiałów przeanalizowanych w pracy.

## 8. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

### 8.1 Podsumowanie

Elewacje wentylowane stają się coraz bardziej popularnym rozwiązaniem technicznym elewacji i są tożsamy ze zrównoważonym rozwojem budownictwa z uwagi między innymi na ich właściwości termodynamiczne. Elewacje te mogą być wykończone różnymi okładzinami elewacyjnymi, a najpopularniejsze są obecnie płyty włóknisto-cementowe.

Sytuacja, w której dochodzi do pożaru oddziaływującego na elewacje, zazwyczaj przez otwór okienny bądź drzwiowy, jest bardzo niebezpieczna, ponieważ poza destrukcją struktury wewnętrznej wyrobu budowlanego, jakim są płyty włóknisto-cementowe, dochodzi również do destrukcji innych elementów systemu elewacji. W konsekwencji może powodować to odpadanie części elementów z elewacji i stanowić zagrożenie dla osób ewakuujących, co utrudnia pracę służb ratowniczych. Odpadanie elementów okładzin elewacyjnych wiąże się ściśle m.in. ze stadiami destrukcji płyt włóknisto-cementowych. Wyróżnia się trzy stadia destrukcji: nieistotną destrukcję, istotną destrukcję, krytyczną destrukcję – zgodnie z nomenklaturą zaproponowaną przez M. Szymkowską [161].

Problemem naukowym, a zarazem głównym celem niniejszej pracy naukowej była identyfikacja modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożaru.

W pierwszym kroku dokonano krytycznej analizy literatury przedmiotu w zakresie:

- wymagań formalnych stawianych w Polsce i w Europie dla poszczególnych elementów i kompletnych systemów elewacji wentylowanych;
- problematyki i efektów zachodzących w zakresie rozwoju pożarów na elewacjach wentylowanych (w tym: rozprzestrzeniania się pożaru pomiędzy kondygnacjami, efektu ciągu kominowego oraz odpadania elementów elewacji wentylowanych podczas pożaru);
- informacji i składu płyt włóknisto-cementowych;
- destrukcja płyt włóknisto-cementowych pod wpływem wysokich temperatur.

Do oceny zjawisk zachodzących podczas pożaru elewacji oraz rozwiązania problemu naukowego wykorzystano badania wielkoskalowe, w tym badania na modelu rzeczywistym elewacji w teście skali naturalnej przeprowadzonych w akredytowanym laboratorium i badania na elewacji na budynku modelowym. W przypadku modeli rzeczywistych zastosowano przebieg temperatury zgodnie z krzywą normową, a źródłem ognia był palnik gazowy. Palnik uwalniał gaz z zadaną prędkością, celem uzyskania właściwego przebiegu temperatury. Dla budynku modelowego zastosowano inne źródło paliwa, tj. beleczki drewniane zgodnie z normą: PN-B- 02867 [88]. Badania wielkoskalowe pozwalają bardzo dobrze odwzorować krytyczną sytuację jaką jest pożar oddziaływujący na elewację budynku.

Niestety z uwagi na duże gabaryty platform badawczy oraz skomplikowany proces, koszty takich badań są bardzo wysokie, a co za tym idzie niezbyt często używane są one w badaniu zagadnień naukowych.

Badania modeli wielkoskalowych wykonano na próbie 10 modeli oznaczonych jako serie od A do J. Kolejno przeprowadzono badania lokalne mikro- i makrostruktury płyt włóknisto-cementowych, pobierając próbki z trzech modeli (serie badań D, J, F). Poszczególne serie badań stanowiły przekrój materiałów dostępnych na rynku o zastosowaniu okładzin elewacyjnych z tym, że największą ilość stanowiły modele z okładzinami wykonanymi z płyt włóknisto-cementowych. Dla wszystkich serii badań dokonano oceny wizualnej oraz oceny przebiegu badania wielkoskalowego z określeniem odpadających elementów z elewacji i ich gabarytów.

Wykorzystując wyniki uzyskane z termopar dla poszczególnych serii badań, utworzono globalne mapy temperatur dla wcześniej przebadanych modeli. Celem poszerzenia wyników badań przyjętych do opracowania globalnych map temperatur ze względu na ilość danych wejściowych, poza płytami włóknisto-cementowymi, przyjęto również spieki ceramiczne.

Wykonanie badań wielkoskalowych na modelach rzeczywistych i elewacji budynku modelowego w zakresie oddziaływania pożaru, umożliwiło porównanie tych badań i wskazanie krytycznego przypadku badania.

Następnie oceniono w zakresie lokalnym stopień destrukcji płyt włóknisto-cementowych pobranych z modelu rzeczywistego i budynku modelowego w strefach charakterystycznych. Analizę i ocenę płyt włóknisto-cementowych poddanych oddziaływaniu pożarem przeprowadzono za pomocą:

- badania wytrzymałości na zginanie  $MOR$  wg PN-EN 12467;
- analizy powierzchni pod mikroskopem cyfrowym;
- analizy struktury pod mikroskopem skaningowym;
- analizy wizualnej próbek.

Na podstawie badań z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego oraz elektronowego mikroskopu skaningowego przeanalizowano widoki i strukturę próbek pobranych po oddziaływaniu wysokimi temperaturami oraz porównano je z próbkami referencyjnymi. Kolejno określono parametry próbek wytrzymałości na zginanie  $MOR$  i pracy łamania  $W_f$  oraz przypisano poszczególnym próbkom odpowiedni stopień destrukcji zgodnie z klasyfikacją opracowaną przez Mateusza Szymkowskiego [161]:

- nieistotna destrukcja;
- istotna destrukcja;
- krytyczna destrukcja.

Na podstawie sklasyfikowanych stopnia destrukcji płyt włóknisto-cementowych opracowano autorskie globalne mapy stref destrukcji przedstawiające zakres strefy krytycznej, która to oznacza istotną oraz krytyczną destrukcję.

Na podstawie badań opracowano autorski model zniszczenia próbek. Model zniszczenia dla fazy rozproszonej jest zależny temperatury, początkową destrukcję wskazuje „przebarwienie” się włókien. Wykazano, że niemożliwe jest określenie granicy wskazującej na modelach rzeczywistych miejsce z istotną destrukcją. W przypadku fazy osnowy funkcja czasu i temperatury jest krytyczna – matryca cementowa „wytrzymuje” krótkie oddziaływania nawet bardzo wysokimi temperaturami.

Następnie zidentyfikowano globalny problem odpadania elementów okładzin elewacyjnych w warunkach oddziaływania pożaru.

Kolejno przedstawiono wnioski z badań wraz z proponowanymi kierunkami badań oraz praktycznym zastosowaniem wyników uzyskanych w niniejszej rozprawie doktorskiej.

## 8.2 Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych rozważań, przeglądu literatury oraz przeanalizowanych i zinterpretowanych rezultatów badań własnych sformułowano wnioski końcowe potwierdzające rozwiązanie problemu naukowego i osiągnięcie postawionych w pracy celów. Znaczna część wyników ma zastosowanie aplikacyjne w projektowaniu oraz realizacji kompletnych systemów elewacji wentylowanych. Najważniejsze osiągnięcia naukowe i badawcze rozprawy doktorskiej przedstawiono poniżej.

1. Zrealizowano badania na modelach rzeczywistych elewacji, a na ich podstawie:

- a) Opracowano lokalne i globalne mapy temperatur, które wykazują rozkład temperatury na powierzchni okładzin i w przestrzeni wentylacyjnej elewacji wentylowanych, mogą one posłużyć do projektowania: elementów podkonstrukcji, okładzin i połączeń, w tym połączeń mechanicznych i adhezyjnych.
- b) Opracowano globalne mapy destrukcji, które wskazują przebieg destrukcji okładzin elewacyjnych stosowanych na modelach rzeczywistych, w których wskazano zakres elewacji poddanej największym obciążeniu ogniowym; opracowano globalne mapy destrukcji wskazujące strefę krytyczną wyznaczającą: destrukcję nieistotną, od destrukcji istotnej oraz krytyczną. Strefa krytyczna wskazuje potencjalne miejsca odpadania elementów przy prawidłowym sposobie zniszczenia, tj. zniszczenie struktury płyty i połączeń mechanicznych. Nieprawidłowym sposobem zniszczenia jest utracenie właściwości kleju utrzymującego okładzinę elewacyjną przy sposobie montażu adhezyjnego spowodowanego wysokimi temperaturami pożarowymi.
- c) Opracowano model zniszczenia płyt włóknisto cementowych, który opisano poniżej, tym samym potwierdzając tezę 1, przedstawioną w pkt. 2.4: *Identyfikacja modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych jest możliwa na podstawie badań na modelach wielkoskalowych*, a mianowicie:

- Faza rozproszona: przy temperaturze ok. 200°C następuje „przebarwienie” pierwszych włókien na kolor brązowy, utrata elastyczności całości próbki jest minimalna (pojedyncze włókna wykazują większą utratę elastyczności). Przy temperaturze ok. 400°C wszystkie włókna „przebarwiają” się oraz widoczna jest znaczna utrata ich elastyczności, wpływa to na elastyczność całej próbki. Utrzymywanie temperatury ok. 400°C przez kilka minut, do ogrzania całego przekroju kompozytu, powoduje całkowitą pirolizę włókien. W przypadku fazy rozproszonej w zakresie jej zniszczenia istotniejsze jest osiągnięcie krytycznej temperatury aniżeli czas oddziaływania temperaturą krytyczną oraz funkcja czasu i temperatury.
- Faza osnowy matrycy cementowej: przy temperaturze ok. 300°C widoczne są mikropęknięcia struktury matrycy, w przypadku dłuższego oddziaływania takimi temperaturami ok. 20 minut, takie temperatury są krytyczne i wyczerpują nośność fazy osnowy. Temperatury ok. 400°C w czasie już ok. 15 minut są krytyczne dla matrycy cementowej. W przypadku matrycy cementowej krytyczne dla niej są czas i funkcja temperatura-czas oddziaływania wysokimi temperaturami, a wtórnym jej wysokość. Matryca jest w stanie znieść wysokie temperatury przez krótki czas oddziaływania bez wpływu na jej wytrzymałość.
- Model zniszczenia płyt włóknisto-cementowych w przypadku próbek referencyjnych odbywa się poprzez wyciągnięcie włókien lub ich zerwanie, gdzie w przypadku próbek poddanych znacznemu oddziaływaniu wysokimi temperaturami znacznie mocniejszym elementem jest faza osnowy i zniszczenie odbywa się głównie poprzez zerwanie włókien (w przypadku, gdy całkowita piroliza nie zaszła).
- W matrycy cementowej wcześniej zauważalne są efekty wysokich temperatur (mikropęknięcia spowodowane rozszerzalnością cieplną), lecz to faza rozproszona szybciej wyczerpuje swoją całkowitą nośność (oraz odpowiada za istotną i krytyczną destrukcję).
- W przypadku istotnej i krytycznej destrukcji, niemożliwe jest określenie parametrów temperatury wykazujących jej różnicę, różnica wynika z czasu oddziaływania na element. W modelach rzeczywistych istotna destrukcja niemalże nie występuje.
- Stan przejścia z nieistotnej destrukcji w istotną destrukcję charakteryzuje zjawisko „przebarwienia się” włókien na kolor brązowy, po którym włókna całkowicie tracą swoje parametry w zakresie plastycznym, co uwidacznia się na próbie zginania próbek (nie wykazują one fazy plastycznej). Przejście z istotnej w krytyczną destrukcję charakteryzuje zjawisko pirolizy „przebarwionych” wcześniej włókien.

2. Przeanalizowano i opisano przebieg badania modeli wielkoskalowych z elewacjami wentylowanymi pod wpływem oddziaływania pożarem w zakresie identyfikacji globalnego problemu odpadania



elementów okładzin elewacyjnych w warunkach oddziaływania pożaru, o których mowa w par. 225 WT [132]: „Elementy okładzin elewacyjnych powinny być mocowane do konstrukcji budynku w sposób uniemożliwiający ich odpadanie w przypadku pożaru w czasie krótszym niż wynikający z wymaganej klasy odporności ogniowej dla ściany zewnętrznej”, wobec czego:

- a) Niemożliwe jest całkowite wyeliminowanie odpadania elementów okładzin zewnętrznych wykonanych z płyt włóknisto-cementowych z elewacji wentylowanej podczas pożaru, a co za tym idzie – spełnienie w sposób literalny zapisów z Rozporządzenia [132] wobec czego teza 2, przedstawiona w pkt. 2.4: *Obecnie na rynku materiałów budowlanych, nie są dostępne płyty włóknisto-cementowe, które to spełnią wymagania „nieodpadania elementów okładzin w warunkach pożaru” w rozumieniu par. 225 warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* została potwierdzona. Należy możliwie zredukować elementy odpadające z elewacji celem poprawy bezpieczeństwa ewakuacji.
- b) We wszystkich modelach rzeczywistych występowała problematyka odpadania okładzin elewacyjnych pod wpływem oddziaływania pożarem. Płyty włóknisto-cementowe porównując z innymi materiałami badanymi w pracy m.in. materiałami ceramicznymi, płytami HPL, są względnie „bezpiecznym” materiałem w zakresie „odpadających elementów” w warunkach oddziaływania pożarem, tzn. po wyczerpaniu nośności, przy właściwym montażu ulegają rozpadowi na niezbyt duże elementy.
- c) Zwiększenie bezpieczeństwa w zakresie „nieodpadania części elementów elewacji” można uzyskać poprzez odpowiednie zabezpieczenie gładów np. blachą stalową, która znacząco ogranicza dostawanie się płomieni wewnątrz przestrzeni wentylacyjnej, a co za tym idzie – ogranicza dostęp do podkonstrukcji oraz wszystkich połączeń.
- d) Bardzo duże znaczenie w przypadku odpadania elementów okładzin ma stosowanie mocowania mechanicznego (co opisano poniżej):
  - Wykorzystanie wyłącznie połączeń adhezyjnych płyt włóknisto-cementowych z podkonstrukcją powoduje, iż zwiększa się prawdopodobieństwo odpadania płyt w całości, co jest niedopuszczalne dla bezpieczeństwa ewakuacji.
  - Otworowania w płytach włóknisto-cementowych są potencjalnie miejscami, w których w fazie krytycznej destrukcji ma miejsce rozpadanie się okładzin i odpadanie elementów (w małych kawałkach).
  - Połączenia adhezyjne już w temperaturze 120°C są zawodne i stanowią duże niebezpieczeństwo.

3. Obecnie nie ma badania lokalnego mogącego odwzorować legislacyjny zakres par. 225 WT [132], konieczne jest przeprowadzanie badań na modelach rzeczywistych elewacji albo budynku modelowym.

4. Badania na modelu rzeczywistym elewacji ze źródłem ognia, jakim jest palnik gazowy, są krytycznym i zarazem najgorszym przypadkiem dla oddziaływania pożarem na elewacje, co przedstawiają badania budynku modelowego poddanego oddziaływaniu pożarem, gdzie tylko mała strefa wykazała krytyczną destrukcję, a zakres zniszczenia elewacji był minimalny.

Ponadto, zaobserwowano zjawisko, którego nigdzie wcześniej w literaturze naukowej nie opisano dot. „przebarwiania” się włókien, co daje możliwość weryfikacji próbki materiałowej pobranej z elementów i wykazania, w jakim stadium destrukcji jest materiał. To zjawisko może być kluczowe w łatwości oceny o ponownym wykorzystaniu i celu wykorzystania płyt włóknisto-cementowych.

### **8.3 Proponowane kierunki badań**

Badania przeprowadzone w niniejszej rozprawie wykazują ich przydatność w zakresie identyfikacji modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożaru. Wykazano, jak destruktywny wpływ mają wysokie temperatury pożarowe na płyty włóknisto-cementowe, lecz nadal zauważalny jest znaczący potencjał do odzysku części płyt po oddziaływaniu pożarem na dany element. W związku z tym, zdaniem autora, występuje ogromny potencjał co do realizacji kolejnych badań i analiz wpływu wielu czynników na płyty włóknisto-cementowe. Kontynuacja tematu, zdaniem autora pracy, powinna dotyczyć między innymi:

1. Próby opracowania metody oceny badania lokalnego na próbkach odwzorowującego badania na modelach rzeczywistych, celem możliwego określenia zagrożenia destrukcji płyt włóknisto-cementowych oraz innych okładzin elewacyjnych, oraz ich wpływu na potencjalne bezpieczeństwo w zakresie odpadania części elementów z elewacji.
2. Opracowania propozycji ponownego wykorzystania płyt włóknisto-cementowych poddanych oddziaływaniu pożarem znajdujących się w strefie krytycznej charakteryzujących się istotną i krytyczną destrukcją.
3. Opracowania sposobu zabezpieczeń przeciwpożarowych elewacji wentylowanych m.in. w zakresie sposobu montażu, połączeń i rozwoju kompozytu, jakim są płyty włóknisto-cementowe w zakresie mikro- i makrostruktury celem zwiększenia bezpieczeństwa.

### **8.4 Praktyczne zastosowanie**

Badania przeprowadzone w niniejszej rozprawie wykazują ich przydatność w identyfikacji modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożaru oraz w zakresie ograniczenia odpadania elementów okładzin z elewacji wentylowanej. Praktyczne zastosowanie przeprowadzonych badań opisano poniżej:

1. Model zniszczenia płyt włóknisto-cementowych umożliwia rozwijanie i modyfikację ich mikro- i makrostruktury celem zwiększenia bezpieczeństwa i stabilności w warunkach pożaru.
2. Możliwe jest powtórne wykorzystanie płyt włóknisto-cementowych będących poza strefą krytyczną w przypadku pożaru elewacji, jako okładziny elewacyjne, uwzględniając odpowiednio zredukowane parametry charakterystyczne.
3. Możliwe jest opracowanie propozycji ponownego wykorzystania płyt włóknisto-cementowych poddanych oddziaływaniu pożaru znajdujących się w strefie krytycznej charakteryzujących się istotną i krytyczną destrukcją.
4. Globalne mapy temperatury i globalne mapy destrukcji umożliwiają projektowanie poszczególnych elementów systemu elewacji wentylowanej z uwagi na warunki pożaru, tj. podkonstrukcja, konsole, połączenia.
5. Globalnych map destrukcji i wiedzy z zakresu identyfikacji modelu zniszczenia elewacji wentylowanych może zostać wykorzystana do zwiększenia bezpieczeństwa w prowadzeniu akcji ewakuacyjnych i gaśniczych.
6. Zastosowanie aplikacyjne ma wiedza w zakresie odpowiedniego zabezpieczenia glifów np. blachą stalową, która znacząco ogranicza dostawanie się płomieni wewnątrz przestrzeni wentylacyjnej, a co za tym idzie – ogranicza dostęp do podkonstrukcji oraz wszystkich połączeń.
8. Zastosowanie aplikacyjne ma baza wiedzy odnośnie rozwiązania montażu płyt włóknisto-cementowych, które to zwiększenia bezpieczeństwa w warunkach pożaru.

**KONIEC**

## 9. BIBLIOGRAFIA

- [1] Adamczak-Bugno A, Gorzelańczyk T, Krampikowska A, Szymków M. Nieniszczące badania struktury materiałów włóknisto-cementowych z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego. *Badania Nieniszczące i Diagnostyka*, nr 3, s. 20-23, 2017.
- [2] Adamczak-Bugno A, Krampikowska A, Swit G. Analysis of the Frequency of Acoustic Emission Events in Terms of the Assessment of the Reduction of Mechanical Parameters of Cellulose-Cement Composites. *Materials*, tom 14, nr 19, 2021.
- [3] Agopyan V, Savastano H Jr, John V M, Cincotto M A. Developments on vegetable fibre–cement based materials in Saõ Paulo, Brazil: an overview. *Cement & Concrete Composites*, nr 27, s. 527–536, 2005.
- [4] Al-Attar A, Abdulrahman M, Hussein H, Tayeh B. Investigating the behaviour of hybrid fibre-reinforced reactive powder concrete beams after exposure to elevated temperatures. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019.
- [5] Almeida A E F S, Tonoli G H D, Santos S F, Savastano H. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. *Cement & Concrete Composites*, nr 42, s. 49-58, 2013.
- [6] Anderson J, Boström L, McNamee J R, Milovanović B. Modeling of fire exposure in facade fire testing. *Fire and Materials*, nr 42, s. 475-483, 2018.
- [7] Anderson J, Boström L, McNamee J R. Fire Safety of Facades. RISE Research Institutes of Sweden, SP Rapport 2017:37, Brandforsk 2017.
- [8] Anderson J, Jansson R. Experimental and numerical investigation of fire. *Fire Computer Modeling Santander 18-19th October 2012*, Hiszpania, 2012.
- [9] Ardanuy M, Claramunt J, Toledo Filho R D. Cellulosic Fiber Reinforced Cement-Based Composites: A Review of Recent Research. *Construction and Building Materials*, nr 79, s. 115-128, 2015.
- [10] Bednarek Z, Drzymała T. Wpływ temperatur występujących podczas pożaru na wytrzymałość na ściskanie fibrobetonu. *Zeszyty Naukowe SGSP*, nr 36, s. 61-84, 2008.
- [11] Bednarek Z, Drzymała T. Wytrzymałość na ściskanie fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych w warunkach termicznych pożarów. *Międzynarodowa Konferencja „Bezpieczeństwo Pożarowe Budowli”*, Warszawa, 18-19 listopad 2008.
- [12] Bednarek Z, Krzywobłocka – Laurów R, Drzymała T. Effect of high temperature on the structure, phase composition and strength of concrete. *Zeszyty Naukowe SGSP*, nr 38, s. 5-27, 2009.
- [13] Behnood A, Ghandehari M. Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures. *Fire Safety Journal*, tom 44, nr 8, s. 1015–1022, 2009.
- [14] Bełzowski A. Degradacja mechaniczna kompozytów polimerowych: metody oceny. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, 2002.
- [15] Bentchikou B, Guidoum A, Scrivener K, Silhadi K, Hanini S. Effect of recycled cellulose fibres on the properties of lightweight cement composite matrix. *Construction*, nr 34, p. 451–456., 2012.

- [16] Bentur A, Akers S A S. The microstructure and ageing of cellulose fibre reinforced cement composites cured in a normal environment. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, tom 11, nr 2, s. 99-109, 1989.
- [17] Bezerra E M, Joaquim A P, Savastano H. Some properties of fiber-cement composites. *Conferencia Brasileira de Materiais e Tecnologias Não Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social Brasil-Nocmat*, 2004.
- [18] Bonner M. Rein G. Flammability and multi-objective performance of building: towards optimum design. *International Journal of High-Rise Buildings*, nr 7, s. 363-374, 2018.
- [19] Boström L, Hofmann-Böllinghaus A, Colwell S, Chiva R, Tóth P, Moder I, Sjöström J, Anderson J, Lange D. Development of a European approach to assess the fire performance of facades. *European Commission Brussels*, 2018.
- [20] Boström L, McNamee D. Fire test of ventilated and unventilated wooden facades. *SP Report 2016:16*, Boras, 2016.
- [21] Bostrom L, Skarin C, Duny M, McNamee R. Fire test of ventilated and unventilated wooden facade. *Boras: SP Report 2016:16*, 2016.
- [22] Brulić E, Dzidic S. Lessons Learned from Grenfell Tower Fire. *14th International Scientific Conference INDIS 2018*, Sebia, 2018.
- [23] BS 8414-1:2015+A1:2017. Fire performance of external cladding systems. Test method for non-loadbearing external cladding systems applied to the masonry face of a building, *Building Research Establishment*.
- [24] Callister W D, Tethwisch D G. *Materials science and engineering an introduction*. John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [25] Chen D, Lo S M, Lu W-Z, Yuen K K, Fang Z. A numerical study of the effect of window configuration on the external heat and smoke spread in building fire. *Numerical Heat Transfer*, nr 40, s. 821-839, 2001.
- [26] Chow W K, Hung W Y, Gao Y, Zou G, Dong H. Experimental study on smoke movement leading to glass damages in double-skinned facade. *Construction and Building Materials*, nr 21, s. 556-566, 2007.
- [27] Claramunt J, Ardanuy M, García-Hortal J A. Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites. *Carbohydrate Polymers*, nr 79, s. 200-205, 2010.
- [28] Colwell S, Baker T. *Fire Performance of external thermal insulation for walls of multistorey buildings*, 3rd edn. red., Garston: IHS BRE Press, 2013.
- [29] Cooke A M, Akers S. The effect of aluminous additives on the properties of Autoclaved Cellulose Fibre Cement. *11th Int. Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference*, Madrid, 2008.
- [30] Cooke A M. Durability of Autoclaved Cellulose Fiber Cement Composites. *Conference on Inorganic Bonded Wood and Fiber Composites*, Idaho, 2000.
- [31] Cooke T. Formation of Films on Hatschek Machines. *Bonded Wood and Fiber Composites Conference*, Idaho, 2020.

- [32] Coutts R S P. A Review of Australian Research into Natural Fiber Cement Composites. *Cement & Concrete Composites*, nr 27, s. 518-526, 2005.
- [33] Degler J, Ellasson A, Anderson J, Lange D. A-priopri modelling of the tiso va fire test as input to the experimental work. *The First International Conference on Structural Safety under Fire & Blast*, Glasgow, 2015.
- [34] Doleželová M, Scheinherrová L, Krejsová J, Vimmrová A. Effect of high temperatures on gypsum-based composites, *Construction and Building Materials*, nr 168, s. 82-90, 2018.
- [35] Dréan V, Girardin B, Guillaume E, Fateh T. Numerical simulation of the fire behaviour of facad. *Fire and Materials*, nr 43, s. 981-1002, 2019.
- [36] Drelich R, Gorzelańczyk T, Pakuła M, Schabowicz K. Automated Control of Cellulose Fiber Cement Boards with a Non-Contact Ultrasound Scanner. *Automation in Construction*, nr 57, s. 55-63, 2015.
- [37] Drelich R, Gorzelańczyk T, Pakuła M, Schabowicz K. NDT testing of cellulose fibre cement boards using non-contact ultrasound. *NDE for Safety / Defektoskopie 2012, 42nd International Conference, Czech Republic (Defektoskopie 2012)*, Oct 30 - Nov 1, 2012.
- [38] Drzymała T, Ogrodnik P, Zegardło B. Wpływ oddziaływania wysokiej temperatury na zmianę wytrzymałości na zginanie kompozytów cementowych z dodatkiem włókien polipropulenowych. *Technika Transportu Szynowego*, tom 23, nr 12, s. 82-86, 2016.
- [39] EAD 090062-00-0404: Kits for external wall claddings mechanically fixed, European Organisation for Technical Approvals: Brussels, Belgium, 2012
- [40] EOTA ETAG 034 Part 1: Ventilated Cladding Kits Comprising Cladding Components and Associated Fixings; European Organisation for Technical Approvals. Brussels, Belgium, 2012.
- [41] EOTA ETAG 034 Part 2: Cladding Kits comprising Cladding components, associated fixings, subframe and possible insulation layer. Brussels, Belgium, 2012.
- [42] EOTA No 761/PP/GRO/IMA/19/1133/11140. Finalisation of the European approach to assess the fire performance of facades. European Commision, Brussels, Belgium, 2019
- [43] Gorzelańczyk T, Schabowicz K, Szymków M J. Application of the acoustic emission method and artificial neural networks to assess the damaging effect of high temperature on the structure of fibre-cement boards. *Materials*, tom 15, nr 18, s. 1-16, 2022.
- [44] Gorzelańczyk T, Schabowicz K. Badania płyt włóknisto -cementowych zawierających materiały z recyklingu. *Materiały Budowlane*, nr 10, s. 27-29, 2015.
- [45] Gorzelańczyk T, Schabowicz K. Nieniszczące badania płyt włóknisto-cementowych metodą dielektryczną. *Przegląd spawalnictwa*, nr 11, s. 24-27, 2014.
- [46] Gorzelańczyk T, Schabowicz K. Nondestructive Testing of Moisture in Cellulose Fiber Cement Boards. *3rd Int. Conference Durability and Effectiveness of Repairing of Buildings*, Poznań, 2014.
- [47] Gorzelańczyk T, Schabowicz K. Rewitalizacja elewacji budynków z zastosowaniem płyt włóknisto-cementowych. *Materiały Budowlane*, nr 11, s. 163-165, 2015.
- [48] Graf S H. Ignition Temperatures of Various Papers, Woods, and Fabrics. Oregon, State University, Corvallis, Engineering Experiment Station, 1949.

- [49] Grattan-Bellew P. Microstructural investigation of deteriorated Portland cement concretes. *Construction and Building Materials*, tom 1, nr 10, s. 3-16, 1996.
- [50] Hamad W Y. *Cellulosic materials-fibers, networks and composites*. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [51] Handle F. *Extrusion in Ceramics*. Springer, Berlin Heidelberg, 2008.
- [52] Heikala M, El-Didamony H, Sokkary T, Ahmed I. Behavior of composite cement pastes containing microsilica and flyash at elevated temperature. *Construction and Building Materials*, tom 38, s. 1180-1190, 2013.
- [53] Horikoshi T, Ogawa A, Saito T, Hoshiro H, Fischer G, Li V. Properties of polyvinylalcohol fiber as reinforcing materials for cementitious composites. *International RILEM workshop on HPFRCC in structural applications*, s. 147, 2006.
- [54] Hu L, Liu S, Zhang X. Flame heights of line-source buoyant turbulent non-premixed jets with air entrainment constraint by two parallel side walls. *Fuel*, nr 200, s. 583–589, 2017.
- [55] Hurley M. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fifth Edition Volume I*, Springer New York, 2016.
- [56] Ibañez-Puy M, Vidaurre-Arbizu M, Sacristán-Fernández J A, Martín-Gómez C. Opaque Ventilated Façades: Thermal and energy performance review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr 79, s. 180–191, 2017.
- [57] Ibrahim M, Sharaf eldin A M, Abdraboo M F, Ayoub M. Effect of Window Configurations on Fire Spread in Buildings. *11th International Energy Conversion Engineering Conference*, 2013.
- [58] Ikai S, Reichert J R, Rodrigues A V, Zampieri V A. Asbestos-free technology with new high toughness polypropylene (PP) fibers in air-cured Hatschek process. *Construction and Building Materials*, nr 24, s. 171-180, 2010.
- [59] Incropera F, DeWitt D, Bergman T, Lavine A. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th Edition, John Wiley & Sons, 2007.
- [60] Informacje ze strony internetowej <http://www.cembrit.com>.
- [61] Informacje ze strony internetowej <http://www.equitone.com>.
- [62] Informacje ze strony internetowej <http://www.esal.si>.
- [63] Informacje ze strony internetowej [https://de.wikipedia.org/wiki/Ludwig\\_Hatschek](https://de.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Hatschek).
- [64] Informacje ze strony internetowej <https://en.itec.cat/infoitec/articles-en/fires-fire-spreading-facade-large-scale-tests/>
- [65] Informacje ze strony internetowej [https://en.wikipedia.org/wiki/Grenfell\\_Tower\\_fire](https://en.wikipedia.org/wiki/Grenfell_Tower_fire).
- [66] Informacje ze strony internetowej <https://metro.co.uk/2021/08/29/high-rise-building-engulfed-in-flames-on-outskirts-of-milan-15172879/>.
- [67] Informacje ze strony internetowej <https://pl.wikipedia.org/wiki/Azbest>.
- [68] Informacje ze strony internetowej <https://portalkomunalny.pl/historia-azbestu-od-euforiizakazu-314159>.

- [69] Informacje ze strony internetowej <https://wroclaw.naszemiasto.pl/budynek-c-13-politechniki-wroclawskiej-ma-wlasna-melodie/ga/c13-2720178/zd/12281600>.
- [70] Informacje ze strony internetowej <https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/File:Grenfell-Tower-fire1.png>
- [71] Informacje ze strony internetowej <https://www.kingspan.com/>.
- [72] Informacje ze strony internetowej <https://www.kuraray.us.com/products/fibers/kuralon-and-kuralon-k-ii>.
- [73] Informacje ze strony internetowej [https://www.livingrent.org/from\\_glasg](https://www.livingrent.org/from_glasg)
- [74] Informacje ze strony internetowej <https://www.portalsamorzadowy.pl/gospodarka-komunalna/dom-wokol-drzewa-podkowa-lesna-pokazala-jak-moze-wygladac-nowoczesne-przedszkole,377022.html>.
- [75] Informacje ze strony internetowej <https://www.spectro-lab.pl/produkt/aparat-do-testow-niepalnoscien-iso-1182/>
- [76] Informacje ze strony internetowej <https://www.theguardian.com/uk-news/2019/dec/06/too-little-has-been-done-since-the-grenfell-tower-fire>
- [77] Ingason H. Modelling of a Two-Dimensional Rack Storage Fire. *Fire Safety Journal*, nr 30, s. 47–69, 1998.
- [78] Ingason H. Two dimensional rack storage fires. 4th international symposium of fire safety science, 1994.
- [79] Instytut Techniki Budowlanej. Praca badawcza nr NP-91/2014. Metodyka badań i oceny ścian zewnętrznych budynków w zakresie odpadania elementów elewacji w przypadku pożaru. ITB, Warszawa, 2014.
- [80] Instytut Techniki Budowlanej. Procedura PB LP-091/1/11-2014. Procedura badania i oceny ścian zewnętrznych budynków w zakresie odpadania elementów elewacji w przypadku pożaru. ITB, Warszawa, 2014.
- [81] ISO 13785-2:2002 Reaction-to-fire tests for façades –Part 2: Large-scale test. International Organization for Standardization.
- [82] ISO 834-8:2002 Fire Resistance Tests – Elements of building construction.
- [83] Jamison K L T, Boadman D A. A new fire performance test for cavity wall insulation. *Proceedings of 2nd international seminar for fire safety of facades, MATEC Web of conferences*, 2016.
- [84] Kalifa P, Menneteau F D, Quenard D. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. *Cement and Concrete Research*, nr 30, s. 1-13, 2000.
- [85] Karlsson B, Thomas P H, Holmstedt G. Flame sizes in a small scale stack: pilot experiments. Department of Fire Safety Engineering, Lund, 1995.
- [86] Kinowski J, Sędlak B, Roszkowski P, Sulik P. Wpływ sposobu zamocowania okładzin elewacyjnych na ich zachowanie w warunkach pożaru. *Materiały Budowlane*, nr 8, s. 204-205, 2017.
- [87] Kinowski J, Sędlak B, Sulik EP. Falling parts of external walls claddings in case of fire – ITBtest method – results comparison. *MATEC Web of Conferences 46 - 2nd International Seminar for Fire Safety of Facades, Lund, Szwecja*, 2016.



- [88] Kolaitis D I, Asimakopoulou E K, Founti M A. A full-scale fire test to investigate the fire behaviour of the ventilated facade system. 14th international fire and engineering conference Interflam, Windsor, 2016.
- [89] Korrhoff I. ETICS and fire safety Basic principles and framework conditions. Third ETICS Forum, Milan, 2015.
- [90] Kosiorek M. Analiza wybranych wymagań dotyczących bezpieczeństwa pożarowego. Materiały Budowlane, nr 7, 2014.
- [91] Kotthoff I. Mechanismen der Brandausbreitung an der Gebäudeaußenwand, Brandverhalten von WDVS unter besonderer Berücksichtigung von Polystyrol-Hartschaum. 9 Hessischer Energieberaterntag, Frankfurt, 2012.
- [92] Kowalski R. Konstrukcje żelbetowe w warunkach pożarowych. Inżynieria i Budownictwo, nr 10, s. 533-538, 2010.
- [93] Kowalski R. Wpływ wysokiej temperatury na cechy mechaniczne betonu. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2019.
- [94] Kowalski R., Abramowicz M. Rola inżynierii bezpieczeństwa pożarowego w projektowaniu konstrukcji budowlanych z uwagi na warunki pożarowe. Inżynieria i Budownictwo, nr 8, s. 425-427, 2017.
- [95] Kowalski R., Modzelewski R. Projektowanie dużych ścian żelbetowych z uwagi na warunki pożarowe. Builder, r. 24, nr 10 s. 45-47, 2020.
- [96] Kowalski R., Wróblewska J. „Badania i oceny stanu technicznego konstrukcji żelbetowych po pożarze”. Diagnostyka obiektów budowlanych. Część 2. Badania i oceny elementów obiektów budowlanych, s. 75-90, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2021.
- [97] Li Z, Zhou X, Bin S. Fiber-Cement extrudates with perlite subjected to high temperatures. Journal of Materials in Civil Engineering, tom 16, nr 3, s. 221-229, 2004.
- [98] Lin C H, Ferng Y M, Hsu W S. Investigating the effect of computational grid sizes on the predicted characteristics of thermal radiation for a fire. Applied Thermal Engineering, nr 29, s. 2243-2250, 2009.
- [99] Livkiss K, Svensson S. Flame Heights and Heat Transfer in Facade System Ventilation Cavities. Fire Technology, nr 54, s. 689-713, 2018.
- [100] McGrattan K, Hostikka S, Floyd J, McDermott R, Vanella M. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation. NIST Special Publication 1018-3 Sixth Edition, National Institute of Standards and Technology and VTT Technical Research Centre of Finland, 2019.
- [101] Miao C, Hamad W Y. Cellulose reinforced polymer composites and nanocomposites: A critical review. Cellulose, nr 20/4, 2013.
- [102] Mohr B J, Biernacki J J, Kurtis K. Microstructural and chemical effects of wet/ dry cycling on pulp fiber-cement composites. Cement and Concrete Research, nr 36, s. 1240-1251, 2006.
- [103] Mohr B J, Nanko H, Kurtis K E. Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling. Cement and Concrete Composites, tom 27, s. 435-448, 2005.

- [104] Nespesny O, Pencik J, Beckovsky D, Vystrcil J, Suhajda K. Determination of material and elasticity constants of cement fibre boards to extend field of application. *Construction and building materials*, nr 306, 2021.
- [105] Ni Z, Lu S, Peng L. Experimental study on fire performance of double-skin glass facades. *Journal of Fire Sciences*, nr 30, s. 457-472, 2012.
- [106] Noumowé A. Effet des hautes températures (20 °C–600 °C) sur le béton. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées, 1995.
- [107] O'Connor D J. Building Facade or Fire Safety Facade?. *Kukuczki 5/4, Issue II*, s. 30-39, 2008.
- [108] Ogrodnik P., Szulej J. The Assessment of Possibility of Using Sanitary Ceramic Waste as Concrete Aggregate—Determination of the Basic Material Characteristics. *Applied Sciences*, nr 8(7), 2018.
- [109] Oleszkiewicz I. Heat transfer from a window fire plume to a building facade. *ASME HTD*, nr 123, s. 163-170, 1989.
- [110] Państwowa Inspekcja Pracy, *Azbest Podręcznik dobrych praktyk*, Warszawa, 2010.
- [111] Pismo Komendy Głównej Państwowej Straży Pożarnej z 30 września 2013 r., nr BZ-III-77/15-2/13 w sprawie interpretacji wymagań z zakresu odpadania elewacji podczas pożaru.
- [112] PN-90/B-02867:1990+Az1:2001 Ochrona przeciwpożarowa budynków. Metoda badania stopnia rozprzestrzeniania ognia przez ściany.
- [113] PN-B-02867:2013-6. Ochrona przeciwpożarowa budynków. Metoda badania stopnia rozprzestrzeniania ognia przez ściany zewnętrzne od strony zewnętrznej oraz zasady klasyfikacji.
- [114] PN-EN 12467+A2:2018-06. Płyty płaskie włóknisto-cementowe - Właściwości wyrobu i metody badań.
- [115] PN-EN 13238-2002. Badania reakcji na ogień wyrobów budowlanych -- Sezonowanie próbek i ogólne zasady wyboru podkładów pod próbki.
- [116] PN-EN 13501-1:2019-02. Klasyfikacja ogniowa wyrobów budowlanych i elementów budynków - Część 1: Klasyfikacja na podstawie badań reakcji na ogień.
- [117] PN-EN 1363-1:2012. Badania odporności ogniowej. Część 1. Wymagania ogólne.
- [118] PN-EN 13823:2010 Badania reakcji na ogień wyrobów budowlanych. Wyroby budowlane, z wyłączeniem posadzek poddane oddziaływaniu termicznemu pojedynczego płonącego przedmiotu.
- [119] PN-EN 14390:2008. Badanie ogniowe -- Badanie odniesienia wyrobów powierzchniowych w pomieszczeniu pełnej skali.
- [120] PN-EN 492+A1:2016-08. Płytki włóknisto-cementowe i elementy wyposażenia -- Właściwości wyrobu i metody badań.
- [121] PN-EN 494+A1:2015-11. Profilowane płyty włóknisto-cementowe i elementy wyposażenia -- Właściwości wyrobu i metody badań.
- [122] PN-EN ISO 1182:2013 Badania reakcji na ogień wyrobów. Badanie niepalności.
- [123] PN-EN ISO 11925-2:2020-09. Badania reakcji na ogień -- Zapalność wyrobów poddawanych bezpośredniemu działaniu płomienia -- Część 2: Badania przy działaniu pojedynczego płomienia.

- [124] PN-EN ISO 1716. Badanie reakcji na ogień wyrobów. Określenie ciepła spalania brutto (wartości kalorycznej).
- [125] Powężka A., Szulej J., Ogrodnik R. Effect of High Temperatures on the Impact Strength of Concrete Based on Recycled Aggregate Made of Heat-Resistant Cullet. *Materials*, nr 13(2), 2020.
- [126] Quan S-L, Kang S-G, Chin I-J. Characterization of cellulose fibers electrospun using ionic liquid. *Cellulose*, nr 17, p. 223–230, 2010.
- [127] Raczkiewicz W. Use of polypropylene fibres to increase the resistance of reinforcement to chloride corrosion in concretes. *Science and Engineering of composite materials*, tom 28, nr 1, s. 555-567, 2021.
- [128] Ranachowski Z, Schabowicz K. *The Fabrication, Testing and Application of fibre cement boards*. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle, 2018.
- [129] Ranachowski Z, Schabowicz K. The contribution of fiber reinforcement system to the overall toughness of cellulose fiber concrete panels. *Construction and Building Materials*, nr 156, s. 1028-1034, 2017.
- [130] Ranachowski Z., Schabowicz K.: *The Fabrication, Testing and Application of fibre cement boards*, Cambridge Scholars Publishing, Newcastle, 2018.
- [131] Rogan R, Shipper E. ASTM Leap Frog Effect. The design and analysis of a computer fire model to test for flame spread through a building's exterior. 2010.
- [132] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z dnia 12 kwietnia 2002 r. (Dz.U. Nr 75, poz. 690)
- [133] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 z dnia 9 marca 2011 r. ustanawiającego zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych.
- [134] Rutkowska G., Ogrodnik R., Fronczyk J., Bilgin A. Temperature Influence on Ordinary Concrete Modified with Fly Ashes from Thermally Converted Municipal Sewage Sludge Strength Parameters. *Materials*, nr 13(22), 2020.
- [135] Rutkowska G., Ogrodnik R., Żółtowski M., Powężka A., Kucharski M., Krejsa M. Fly Ash from the Thermal Transformation of Sewage Sludge as an Additive to Concrete Resistant to Environmental Influences in Communication Tunnel. *Applied Sciences*, nr 12(4), 2022.
- [136] Sawicki J. Montaż dachowych płyt włóknocementowych. *Izolacje*, nr 2, s. 76-77, 2008.
- [137] Schabowicz K, Gorzelańczyk T, Szymków M. Elewacje wentylowane. *Architektura Murator*, tom suplement Fasady, nr 6, s. 36-53, 2017.
- [138] Schabowicz K, Gorzelańczyk T. A nondestructive methodology for the testing of fibre cement boards by means of a non-contact ultrasound scanner. *Construction and Building Materials*, nr 102, s. 200-207, 2016.
- [139] Schabowicz K, Ranachowski Z. *The Fabrication, Testing and Application of fibre cement boards*. w Cambridge Scholars Publishing, Newcastle, 2018.
- [140] Schabowicz K, Sulik P, Gorzelańczyk T, Zawisłak Ł. Assessment of the destruction of a fibre cement board subjected to fire in a large-scale study. *Materials*, vol. 15, nr 8, art. 2929, s. 1-13, 2022.

- [141] Schabowicz K, Sulik P, Zawiślak Ł, Gorzelańczyk T. Numerical analysis of storey-to-storey fire spreading. *Archives of Civil Engineering*, tom 68, nr 1, s. 91-109, 2022.
- [142] Schabowicz K, Sulik P, Zawiślak Ł. Elewacja wentylowana podczas oddziaływania pożarem. *Izolacje*, R. 25, nr 5, s. 65-69, 2020.
- [143] Schabowicz K, Sulik P, Zawiślak Ł. Reduction of load capacity of fiber cement board facade cladding under the influence of fire. *Materials*, tom 14, nr 7, 1-15, 2021.
- [144] Schabowicz K, Szymków M. Elewacje wentylowane z płyt włóknisto-cementowych w ujęciu prawnym. *Izolacje*, nr 9, s. 60-64, 2015.
- [145] Schabowicz K, Szymków M. Elewacje wentylowane z płyt włóknisto-cementowych. *Materiały Budowlane*, nr 4, s. 112-114, 2016.
- [146] Schabowicz K, Zawiślak Ł, Staniów P G. Efficiency of ventilated facades in terms of airflow in the air gap. *Studia Geotechnica et Mechanica*, tom 43, nr 3, s. 224-236, 2021.
- [147] Schabowicz K, Zawiślak Ł. Numerical comparison of thermal behaviour between ventilated facades. *Studia Geotechnica et Mechanica*, tom 42, nr 4, s. 297-305, 2020.
- [148] Schabowicz K. Elewacje wentylowane Technologia Produkcji i metody badania płyt włóknisto-cementowych. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2018.
- [149] Schabowicz K, Gorzelańczyk T. Płyty włókno-cementowe jako okładziny wewnętrzne. *Izolacje*, nr 5, s. 42-44, 2015.
- [150] Schabowicz K, Gorzelańczyk T, Szymków M. Współczesne systemy elewacji wentylowanych - rodzaje i wymagania. *Izolacje*, nr 7/8, s. 74-83, 2017.
- [151] Schabowicz S, Sulik P, Zawiślak Ł. Identification of the destruction model of ventilated facade under the influence of fire. *Materials*, tom 13, nr 10, art. 2387, s. 1-14, 2020.
- [152] Schabowicz, Łukasz Zawiślak, Staniów P G. Elewacje wentylowane - porównanie numeryczne w zakresie termicznym. *Izolacje*, tom 25, nr 7/8, s. 80-85. 2020.
- [153] Schabowicz, Łukasz Zawiślak. Numerical comparison of thermal behaviour between ventilated facades. *Studia Geotechnica et Mechanica*, tom 42, nr 4, s. 297-305, 2020.
- [154] Sędłak B, Kinowski J, Sulik P, Kimbar G. The risks associated with falling parts of glazed façades. *Open Engineering*, nr 8, s. 147-155, 2018.
- [155] Sędłak B, Kinowski J, Sulik P. Falling parts of external walls claddings in case of fire -test method – results comparison. *MATEC Web of Conferences* vol. 46, 2016.
- [156] Smolka M, Anselmi E, Crimi T, Le Madec B, Moder I F, Park K W, Rupp R, Yoo Y-H, Yoshioka H. Semi-natural test methods to evaluate fire safety of wall claddings: Update. *MATEC Web of Conferences* 46, 2016.
- [157] SP FIRE 105. Method for fire testing of façade materials, Department of Fire Technology, Swedish National Testing and Research Institute, 1994.
- [158] Stępień P. Wpływ gezy na proces hydratacji cementów i ich właściwości. Praca doktorska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Katedra Technologii Materiałów Budowlanych, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 2017.

- [159] Suddell B C, Evans W J, Mohanty A K, Misra M, Drzal L T. Natural fiber composites in automotive applications. Natural fibers, biopolymers and biocomposites, CRC, USA, 2005.
- [160] Sulik P, Kinowski J. Bezpieczeństwo użytkowania elewacji. Materiały Budowlane, nr 9, s. 38-39, 2014.
- [161] Szymków M. Identyfikacja stopnia destrukcji płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury. Raport serii PRE nr 9/2018 - Praca doktorska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, 2018.
- [162] Toledo Filho R D, Scrivener K, England G L, Ghavami K. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. Cement & Concrete Composites, nr 22, s. 127-143, 2000.
- [163] Veliseicik T, Zurauskiene R, Valentukeviciene M. Determining the Impact of High Temperature Fire Conditions on Fibre Cement Boards Using Thermogravimetric Analysis. Symmetry, tom 10, nr 10, 2020.
- [164] Weghorst R, Hauze B, Guillaume E. Determination of fire performance of ventilated facade systems on combustible insulations using LEPiR 2. Extended applications approach based on multiscale tests. Proceedings of 14th international fire and engineering conference Interflam, 2016.
- [165] White N, Delichatsios M. Fire hazards of exterior wall assemblies containing combustible components. The Fire Protection Research Foundation, Quincy, 2014.
- [166] Zarządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 12 marca 1996 r., w sprawie dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia, wydzielanych przez materiały budowlane, urządzenia i elementy wyposażenia w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi. (M.P. 1996 nr 19, poz. 231)
- [167] Zboina J. Bezpieczeństwo Pożarowe: Rozważania na gruncie nauki i praktyki. CNBOP-PIB, Józefów, 2018.
- [168] Zhang Q, Ye G. Dehydration kinetics of Portland cement paste at hightemperature. J Therm Anal Calorim, 2012.

## STRESZCZENIE

### Tytuł:

IDENTYFIKACJA MODELU ZNISZCZENIA ELEWACJI WENTYLOWANEJ Z OKŁADZINĄ Z PŁYT WŁÓKNISTO-CEMENTOWYCH POD WPŁYWEM ODDZIAŁYWANIA POŻARU

### Streszczenie:

Elewacje wentylowane są coraz bardziej popularnym rozwiązaniem technicznym elewacji i są tożsame ze zrównoważonym rozwojem budownictwa z uwagi między innymi na ich właściwości termodynamiczne. Poprzez elewację wentylowaną rozumiemy kompletny system składający się z zewnętrznej okładziny elewacyjnej, mechanicznie lub adhezyjnie przymocowanej do podkonstrukcji, nazywanej również ruszt. Ruszt jest z kolei przymocowany w sposób mechaniczny do ściany zewnętrznej budynku. Montaż podkonstrukcji do ściany odbywa się zazwyczaj poprzez konsole – elementy o możliwej regulacji, utrzymujące odpowiednią płaszczyznę okładziny zewnętrznej na nieidealnie wykonanej ścianie zewnętrznej – konstrukcyjnej lub osłonowej.

Wykonano szerokie studia literaturowe, w zakresie: wymagań formalnych stawianych w Polsce i w Europie dla poszczególnych elementów i kompletnych systemów elewacji wentylowanych, problematyki i efektów zachodzących w zakresie rozwoju pożarów na elewacjach wentylowanych, w tym: rozprzestrzeniania się pożaru pomiędzy kondygnacjami, efektu ciągu kominowego oraz odpadania elementów elewacji wentylowanych podczas pożaru, informacji i składu płyt włóknisto-cementowych, destrukcji płyt włóknisto-cementowych pod wpływem wysokich temperatur. Studia literaturowe wykazały, że istnieje potrzeba przeprowadzenia badań naukowych w celu identyfikacji modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożaru.

Do oceny zjawisk zachodzących podczas pożaru elewacji i rozwiązania problemu naukowego wykorzystano badania wielkoskalowe, w tym badania na modelu rzeczywistym elewacji w teście skali naturalnej przeprowadzonych w akredytowanym laboratorium i badania na elewacji na budynku modelowym. W przypadku modeli rzeczywistych zastosowano przebieg temperatury zgodnie z krzywą normową, a źródłem ognia był palnik gazowy. Badania wielkoskalowe pozwalają bardzo dobrze odwzorować krytyczną sytuację jaką jest pożar oddziałujący na elewację budynku.

Badania modeli wielkoskalowych wykonano na próbie 10 modeli oznaczonych jako serie od A do J. Kolejno przeprowadzono badania lokalne mikro- i makrostruktury płyt włóknisto-cementowych, pobierając próbki z trzech modeli (serie badań D, J, F). Poszczególne serie badań stanowiły przekrój materiałów dostępnych na rynku o zastosowaniu okładzin elewacyjnych z tym, że największą ilość stanowiły modele z okładzinami wykonanymi z płyt włóknisto-cementowych. Dla wszystkich serii

badania dokonano oceny wizualnej oraz oceny przebiegu badania wielkoskalowego z określeniem odpadających elementów z elewacji i ich gabarytów. Wykorzystując wyniki uzyskane z termopar dla poszczególnych serii badań, utworzono globalne mapy temperatur dla wcześniej przebadanych modeli.

Następnie wykonano „lokalną” ocenę stopnia destrukcji płyt włóknisto-cementowych pobranych z modelu rzeczywistego i budynku modelowego w strefach charakterystycznych. Analizę i ocenę płyt włóknisto-cementowych poddanych oddziaływaniu pożarem przeprowadzono za pomocą: badania wytrzymałości na zginanie *MOR* wg PN-EN 12467, analizy powierzchni pod mikroskopem cyfrowym, analizy struktury pod mikroskopem skaningowym, analizy wizualnej próbek. Na podstawie badań z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego oraz elektronowego mikroskopu skaningowego przeanalizowano widoki i strukturę próbek pobranych po oddziaływaniu wysokimi temperaturami oraz porównano je z próbkami referencyjnymi. W rezultacie przypisano poszczególnym próbkom odpowiednie stopnie destrukcji: nieistotną destrukcję, istotną destrukcją, krytyczną destrukcję.

Na podstawie sklasyfikowanych stopni destrukcji opracowano autorskie globalne mapy stref destrukcji przedstawiające zakres strefy krytycznej, która to oznacza istotną i krytyczną destrukcję.

Na podstawie badań opracowano autorski model zniszczenia próbek. Model zniszczenia dla fazy rozproszonej jest zależny od przekroczenia krytycznej temperatury, początkową destrukcję wskazuje „przebarwienie” się włókien. Na modelach rzeczywistych wykazano, że niemożliwe jest określenie granicy wskazującej miejsce z istotną destrukcją. W przypadku fazy osnowy funkcja czasu i temperatury jest krytyczna – matryca cementowa wytrzymuje krótkie oddziaływania nawet bardzo wysokimi temperaturami.

Przedstawiono wnioski z badań z zakresu: identyfikacji modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożaru, identyfikacji globalnego problemu odpadania elementów okładzin elewacyjnych w warunkach oddziaływania pożarem i innych. Następnie opisano proponowane kierunki badań oraz praktyczne zastosowaniem wyników uzyskanych w niniejszej rozprawie doktorskiej.

## **ABSTRACT**

### **Title:**

IDENTIFICATION OF THE MODEL OF DESTRUCTION OF THE VENTILATED FAÇADE WITH CLADDING OF FIBER-CEMENT BOARDS UNDER THE INFLUENCE OF FIRE

### **Abstract:**

Ventilated façades are an increasingly popular technical solution for façades and are synonymous with sustainable development of construction due to i.a. their thermodynamic properties. A ventilated façade means a complete system consisting of an external façade cladding, mechanically or adhesively attached to the substructure, also called the grating. The grating is in turn mechanically attached to the external wall of the building. The assembly of the substructure to the wall is usually done through consoles – adjustable elements that maintain the appropriate plane of the external cladding on an imperfectly made external wall – structural or curtain ones.

Comprehensive literature studies were carried out in the field of: formal requirements set in Poland and Europe for individual elements and complete systems of ventilated façades, issues and effects occurring in the field of fire development on ventilated façades, including: fire spreading between storeys, chimney effect and detachment of ventilated façade elements during a fire, information and composition of fiber-cement boards, destruction of fiber-cement boards under the influence of high temperatures. Literature studies revealed the need to perform research in order to identify the model of destruction of the ventilated façade with cladding of fiber-cement boards under the influence of fire.

Large-scale tests were used to assess the phenomena occurring during a façade fire and solve the scientific problem, including tests on a real model of the façade in a full-scale test carried out in an accredited laboratory, and tests on the façade of a model building. In the case of real models, the temperature course was used in accordance with the standard curve, and the source of fire was a gas burner. Large-scale tests allow for a very good mapping of a critical situation, which is a fire affecting the façade of the building.

The tests of large-scale models were carried out on a sample of 10 models marked as series from A to J. Subsequently, local tests of the micro- and macrostructure of fiber and cement boards were carried out, taking samples from three models (test series D, J, F). The individual series of tests were a cross-section of materials available on the market for the use of façade cladding, with the largest number of models with cladding made of fiber-cement boards. For all series of tests, a visual assessment and evaluation of the course of a large-scale test were carried out, specifying the elements detaching from



the façade and their dimensions. Using the results obtained from thermocouples for individual series of tests, global temperature maps were created for the previously tested models.

Then, a “local” assessment of the degree of destruction of fiber-cement boards taken from the real model and the model building in the characteristic zones was performed. An analysis and assessment of fiber-cement boards exposed to fire were carried out by use of: *MOR* bending strength test according to PN-EN 12467, surface analysis under a digital microscope, structure analysis under a scanning microscope, visual analysis of samples. On the basis of research using a digital microscope and a scanning electron microscope, the views and structure of samples taken after being exposed to high temperatures were analyzed and compared with reference samples. As a result, appropriate destruction levels were assigned to individual samples: insignificant destruction, significant destruction, and critical destruction.

On the basis of the classified destruction levels, proprietary global maps of destruction zones were developed, showing the extent of the critical zone, which means significant and critical destruction.

Based on the research, an original model of sample destruction was developed. The destruction model for the dispersed phase is dependent on exceeding the critical temperature, the initial destruction is indicated by the “discoloration” of the fibers. Real models have shown that it is impossible to determine the boundary indicating a place with significant destruction. In the case of a matrix phase, the function of time and temperature is critical – the cement matrix withstands short exposures even at very high temperatures.

Conclusions from research were presented in the field of: identification of the model of destruction of the ventilated façade with cladding of fiber-cement boards under the influence of fire, identification of the global problem of detachment of façade cladding elements during fire and other conditions. Then, the proposed line of research and practical application of the results obtained in this doctoral dissertation have been described.