

Szkoła Główna Służby Pożarniczej

### Recenzja rozprawy doktorskiej

pt.: „Electric cables used in buildings - dependency of fire properties on constructional and material parameters” autorstwa Pani mgr inż. Katarzyny Kaczorek-Chrobak, opracowana na podstawie Uchwały Rady Naukowej Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie z dnia 26 czerwca 2019 r.

#### 1. Tematyka rozprawy

Kable elektryczne zasilania, sterujące i telekomunikacyjne stanowią istotną grupę wyrobów budowlanych wymienioną w załączniku IV do rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) NR 305/2011(CPR) z dnia 9 marca 2011 r. ustanawiającego zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych. Również stosunkowo niedawno po wielu latach ustaleń na szczeblu europejskim powstały przepisy regulujące kwestię oceny kabli elektrycznych i światłowodów pod względem ich palności. Budynek zawierający zaawansowane technologicznie instalacje elektroenergetyczne/komunikacyjne jest obciążony kilometrami bieżącymi kablami. Tak duża ilość kabli, ich konstrukcja i szerokie zastosowanie w obiektach budowlanych znacznie zwiększają ich obciążenie ogniowe i ułatwiają rozprzestrzenianie się płomienia, na duże odległości (zarówno w poziomie, jak i w pionie) w przypadku pożaru. Pomimo że istnieje wymóg prowadzenia głównych ciągów instalacji elektrycznej poza mieszkaniami i pomieszczeniami przeznaczonymi na pobyt ludzi (w wydzielonych kanałach lub szybach instalacyjnych), to należy mieć na uwadze podstawowy przepis Działu VI warunków technicznych dla budynków, który wymaga zaprojektowania i wykonania urządzeń związanych z budynkiem w sposób zapewniający w razie pożaru ograniczenie rozprzestrzeniania się ognia i dymu w budynku oraz możliwość ewakuacji ludzi. Kable elektryczne i światłowody w warunkach pożaru mogą wydzielać duże ilości dymu, toksycznych i często korozyjnych produktów rozkładu termicznego i spalania. Skutki pożarów w sposób bezpośredni i pośredni wpływają na bilans ekonomiczny zwrotu poniesionych kosztów inwestycji budowlanych i na pewno wywołują dezaprobatę i obawę społeczeństwa. Zwarcie instalacji elektrycznej to najczęstsza przyczyna powstania pożarów, która najczęściej pojawia się w informacjach medialnych oraz w obiegowych opiniach osób postronnych.

Stąd też podjęty w pracy problem badawczy - dobór właściwych kabli elektrycznych pod kątem ich właściwości przeciwpożarowych i cel, jakim było określenie zależności właściwości ogniowych od parametrów konstrukcyjno-materiałowych kabli elektrycznych stosowanych w budynkach posiada walory aplikacyjne. Wnioski z pracy mogą stanowić materiał do korekty przepisów wykonawczych dot. bezpieczeństwa pożarowego budynków z punktu projektowania, doboru i wykonania instalacji sieci elektrycznych.

W pracy zaplanowano i zrealizowano bardzo szeroki zakres badań w różnej skali eksperymentalnej z wykorzystaniem wyrafinowanych technik pomiarowych, obszernie je omówiono, skomentowano i sformułowano wnioski końcowe. Przedstawiono różnice zachowania się typowych reprezentatywnych grup układów badawczych (kabli) w ilości 83 w warunkach cieplno-przepływowych występujących podczas pożaru budynków, co stanowi poważne wyzwanie, gdyż kable są układami złożonymi składającymi się z części metalowych, izolacji i powłok wykonanych z materiałów polimerowych o różnej budowie chemicznej, grubościach i dodatkach.

To wszystko potwierdza aktualność, trafność wyboru tematyki i tytułu rozprawy doktorskiej przez Panią mgr inż. Katarzynę Kaczorek-Chrobak i Jej promotora Panią dr hab. inż. Jadwigę Fangrat, prof ITB, który odzwierciedla tematykę i zakres badań. Oryginalność pracy polega na skrupulatnej, kompleksowej analizie wpływu parametrów materiałowych i konstrukcyjnych na zachowanie się przewodów elektrycznych w warunkach pożaru, wykonanej na dużej grupie kabli produkowanych i stosowanych w Europie. Na podstawie przeprowadzonych badań, Autorka do opisu właściwości ogniowych kabli, zaproponowała nowatorski parametr empiryczny  $\Omega$  związany z efektywną objętością elementów niemetalicznych do objętości elementów palnych niemetalicznych kabla oraz efektywnej powierzchni wymiany ciepła w obrębie budowy kabla.

Tematyka rozprawy i zakres badań jednoznacznie wskazuje na umieszczenie jej w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport.

## 2. Charakterystyka rozprawy

Praca zawiera 151 stron. Składa się ze wstępu i jedenastu rozdziałów zawierających dwie główne części pracy - intuicyjną część literaturową i eksperymentalną z częścią analityczną zakończoną wnioskami. Częściami składowymi pracy są ponadto - spis literatury, rysunków (63 pozycji) i tabel (10 pozycji) oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Wykaz literatury to 208 pozycji, w większości prac opublikowanych w ostatnim dziesięcioleciu. Struktura pracy nie budzi zastrzeżeń a ciekawym podrozdziałem pracy, który mnie zaskoczył, jest opis testów pożarowych w warunkach mikrogravitacji i analiza bezpieczeństwa pożarowego instalacji elektrycznych na statkach czy stacjach kosmicznych, czyli rozszerzono problem doboru kabli poza obszar kuli Ziemskiej.

Praca została napisana w sposób staranny, z dbałością o stronę graficzną, nienagannie pod względem stylistycznym, choć dopuszczam drobne błędy językowe (nie jestem native speakerem języka angielskiego), które nie mają wpływu na wartość pracy.

W tytule rozprawy użyto sformułowania „Electric cables used in buildings...”. Jest to wprawdzie określenie intuicyjnie zrozumiałe, ale zakres badań eksperymentalnych przekracza możliwości aplikacyjne otrzymanych rezultatów poza budynki a wyniki badań mogą zostać zaimplementowane też do innych obiektów budowlanych np. tuneli. Zresztą Autorka przedstawiła możliwości zastosowania zasad doboru kabli, biorąc pod uwagę właściwości ogniowe i konstrukcyjno-materiałowe do innych obiektów budowlanych niż budynki.

Rozdział 1 i 2 pracy- zawiera ogólne informacje dotyczące statystyk powstania pożarów w zależności od typu obiektu w Polsce w 2019 r. wraz z porównaniem liczby pożarów w innych krajach europejskich. W tej części pracy ukazano ogólne zasady projektowania bezpieczeństwa pożarowego budynków w Polsce w zależności od odpowiedniej klasy odporności pożarowej budynków i kategorie zagrożenia ludzi. Wykazano jak ważne jest poprawne projektowanie, wykonawstwo instalacji elektrycznych oraz prawidłowy dobór kabli i urządzeń w celu zmniejszenia prawdopodobieństwa powstania pożaru i jego rozprzestrzeniania w zależności od scenariusza rozwoju pożaru. Zwrócono uwagę na funkcje i role kabli w budynkach w zależności od ich zastosowania końcowego tj. ich napięć znamionowych; zastosowania - komunikacja, sieć; właściwości użytkowe – do elastycznych połączeń czy kontroli urządzeń; osobną grupę stanowią kable światłowodowe.

Rozdział 3 pracy przedstawia w sposób wyczerpujący obecny stan wiedzy na temat badań pożarowych instalacji elektrycznych i kabli. Należy zwrócić uwagę, że chociaż prąd elektryczny pod koniec XIX wieku był już dość szeroko wykorzystywany, to jak podaje Autorka pracy regulacja upowszechnieniu energii elektrycznej została podjęta w 1907 r. Jedną z najnowszych norm krajowych w tej dziedzinie jest brytyjska BS 7671 opublikowana w 2008 roku. W 2011 roku kable elektryczne

znalazły się na liście wyrobów budowlanych w Europie, a obecnie ich klasyfikacja w ramach badań reakcji na ogień musi być zgodna z EN 13501-6:2018. Autorka zwraca uwagę na skład chemiczny izolacji kabli, skład ilościowo-jakościowy produktów rozkładu termicznego i spalania wytwarzanych w wyniku ich spalania w warunkach pożaru, interakcje między żyłami a izolacją i inne czynniki decydujące o szybkości rozprzestrzeniania się ognia po wiązkach kabli, na sąsiednie palne materiały w budynku i jego odporność ogniową. Autorka przedstawia badania eksperymentalne dot. palności kabli porównane z wynikami symulacji numerycznych. W pracy również przytoczono badania ogniowe kabli i przewodów elektrycznych w warunkach mikrograwitacji, które powinny być wykorzystane do doboru kabli stosowanych na stacjach i statkach kosmicznych. Warunki mikrograwitacji zbliżone do istniejących w przestrzeni kosmicznej powodują zwiększenie prawdopodobieństwa zapłonu uzyskanej palnej fazy gazowej, z powodu rozszerzenia granic palności.

Część eksperymentalną rozprawy poprzedza opis problemu naukowego pracy i zbiorcze zestawienie parametrów materiałowo – konstrukcyjnych użytych do badań kabli. W rozdziale tym Doktorantka dokonała syntetycznego podsumowania obszernych studiów literaturowych oraz na ich podstawie sformułowała problem naukowy - ze względu na duże zagrożenie pożarowe w budynku, w którym poprowadzono znaczną ilość przewodów, zarówno w wyniku zwarcia w instalacji elektrycznej, jak i postępującego rozprzestrzeniania się pożaru w budynku, bezwzględnie konieczne jest zapewnienie odpowiedniej konstrukcji i parametrów materiałowych kabli wpływających na właściwości przeciwpożarowe budynków. Stąd też głównym problemem naukowym pracy była ocena wpływu poszczególnych konstrukcyjno-materiałowych parametrów kabli elektrycznych na ich właściwości ogniowe.

Część eksperymentalna i analityczna zawiera 7 rozdziałów, z których 4 stanowią opisy wykonanych badań eksperymentalnych lub analiz obliczeniowych, w których wykorzystano wyznaczone parametry istotne do zakresu realizacji pracy.

W celu dokonania właściwej oceny wyników badań ogniowych i określenia zakresu prac podzielono kable na grupy. W tej samej grupie kable różniły się materiałem konstrukcyjnym żył roboczych, ale budowa chemiczna izolacji i powłok była taka sama lub zbliżona. W pracach skupiono się na związku między konstrukcją kabli a ich właściwościami ogniowymi, stąd też kable różniły się parametrem kablowym  $\chi$  – proporcjonalnym do liczby żył roboczych i objętości komponentów palnych przypadających na 1 m wiązki kabla zgodnie z EN 50399, a odwrotnie proporcjonalnym do kwadratu średnicy kabla.

Kable podzielono na pięć grup (rys. 9), wyodrębnionych na podstawie ich parametrów konstrukcyjno-materiałowych a mianowicie:

- I. Materiał konstrukcyjny żył roboczych (miedź lub aluminium) - 14 próbek kabli.
- II. Kształt przekroju żył (okrągły lub sektorowy) - 14 próbek kabli.
- III. Liczba żył roboczych należących do ośmiu różnych rodzin kabli różniących się ogólną konstrukcją i materiałami - 23 próbki kabli.
- IV. Elementy niemetaliczne (powłoki zewnętrzne i/lub izolacje) - 22 próbki kabli (w tym pięć kabli na bazie PVC, siedem kabli z PVC o zmniejszonej palności (PVC-FR) i dwanaście kabli bezhalogenowych o niskiej emisji dymu (LSOH), w większości o nieznanym składzie).
- V. Obecność koncentrycznej bariery - 16 próbek kabli (ocynkowane druty stalowe lub żyły koncentryczne miedziane (taśma i druty) lub druty aluminiowe; w dwóch przypadkach dodatkowo pod powłoką zewnętrzną zastosowano folię miedzianą, a w jednym taśmę ogniochronną pęczniejącą).

Trzydzieści z osiemdziesięciu trzech kabli zostało wykonanych z ognioodpornego PVC, a jedenaście z wybranych próbek kabli zawierało pojedynczą żyłę o różnej średnicy (pole przekroju). Pięć próbek kabli (pozycje nr 23/60, 28/80, 29/74, 31/78, 48/89 zamieszczone w tab. 2) miało charakterystykę dwóch parametrów konstrukcyjno-materiałowych; w związku z tym prezentowano je dwukrotnie,

a jedną próbkę kabla (pozycje 36/65/84) trzykrotnie. Próbki kabli w poszczególnych grupach (I - V) posortowano według rosnących wartości parametru kablowego  $\chi$ . Ze względu na parametr związany z liczbą żył roboczych i nową koncepcją parametru kablowego zbadano sześć kabli o małej liczbie żył (jako kable zasilające) oraz o większej liczbie niż siedem żył (jako kable sterujące). Te kable zostały zbudowane z tych samych materiałów. Badaniami eksperymentalnymi objęto sześć ogniochronnych kabli elektroenergetycznych i sterowniczych bezhalogenowych o różnej konstrukcji (tab. 2), o tym samym rodzaju żyły, powłoce i izolacji. Każdy badany kabel został zbudowany z miedzianych, litych, okrągłych żyły (klasy 1) oraz wewnętrznej izolacji z taśmy mikowej. Główną izolację wykonano z usieciowanych związków poliolefinowych, z powłoką wypełniającą (poza kablem jednożyłowym) z modyfikowanego ogniochronnie usieciowanego poli(etylenu), a powłokę zewnętrzną stanowił kopolimer etylenowo/winyloowo/octanowy (EVA) z wypełniaczem w postaci wodorotlenku glinu (III) (ATH) i boranu cynku - jako środkami zmniejszającymi palność.

W rozdziale 7 Autorka charakteryzuje zastosowane metody badawcze z podziałem - na badania w pełnej skali i małej skali. Badania w pełnej skali wykonano zgodnie z EN 50399. Stężenie dwutlenku węgla mierzono za pomocą niedyspersyjnych spektrometrów w podczerwieni (NDIR), a ubytek tlenu za pomocą analizatora paramagnetycznego. Moc palnika zapalającego wynosiła HRR 20,5 kW, przy przepływie powietrza przez komorę  $(8000 \pm 800)$  l/min. Badania w dużej skali pozwoliły na wyznaczenie 7 głównych parametrów ogniowych czyli: maksymalną szybkość wydzielania ciepła (peak HRR), całkowite ciepło wydzielone z jednostki powierzchni materiału (THR), zasięg rozprzestrzeniania płomienia (FS), maksymalną szybkość wydzielania dymu (peak SPR), całkowity wygenerowany dym (TSP), wytwarzanie palących się kropli lub odpadów oraz emisje toksycznych produktów rozkładu termicznego i spalania. Wszystkie kable zostały przetestowane za pomocą metod badania kabli w pełnej skali.

Właściwości charakteryzujące palność, analizę termiczną, toksyczność produktów rozkładu termicznego i spalania elementów konstrukcyjnych badanych kabli np. osłon zewnętrznych i izolacji żył oznaczano za pomocą różnych technik pomiarowych w małej skali. Analizę pirolizy próbek wykonano za pomocą analizy termogravimetrycznej (TGA) w atmosferze azotu uzupełnionej spektrometrią w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR). Zastosowano stosunkowo dużą jak na analizę TGA szybkość ogrzewania próbek  $50^{\circ}\text{C}/\text{min}$  do  $1000^{\circ}\text{C}$  tak aby odzwierciedlić szybkość nagrzewania obserwowaną w warunkach pożaru. Do analizy parametrów pożarowych w małej skali zastosowano metodę kalorymetru stożkowego wg ISO 5660. Do badań toksyczności produktów rozkładu termicznego i spalania w warunkach spalania ustalonego wykorzystano piec rurowy (piec Pursera). Badania przeprowadzono w temperaturze pieca  $650^{\circ}\text{C}$  i przy zadanych przepływach powietrza 2, 5, 10 i 15 l/min przy obliczonych współczynnikach równoważnikowych odzwierciedlających kontrolowane warunki wentylacji w różnych fazach rozwoju pożaru. Wydajności gazów spalinowych obliczono zgodnie ze specyfikacją ISO 19700.

Rozdział 8 przedstawia szczegółowe zależności pomiędzy parametrami konstrukcyjno-materiałowymi a właściwościami ogniowymi kabli elektrycznych, które są omawiane w 5 kategoriach – rodzaj materiału konstrukcyjnego żył roboczych, kształt przekroju żył, liczba żył, rodzaj elementów niemetalicznych w kablu oraz rodzaj bariery koncentrycznej.

Testy wykonane na dużej liczbie kabli wykazały, że parametry związane z rodzajem materiału użytego do budowy żyły mają mniejsze znaczenie w przypadku właściwości ogniowych kabli elektrycznych, natomiast najważniejszym parametrem konstrukcyjno-materiałowym z punktu widzenia bezpieczeństwa pożarowego budynków jest parametr związanym z rodzajem zastosowanych izolacji i powłok.

Obecność powłoki wypełniającej w kablu skutkuje znacznie niższymi wartościami parametrów charakteryzujących proces spalania (peakHRR, THR, peakSPR i TSP) dla kabli wielożyłowych niż w przypadku kabli jednożyłowych, gdzie płomień penetruje wnętrze kabla bez dodatkowych barier. Podobny trend zaobserwowano w przypadku kabli z więcej niż 19 żyłami (próbka kabla nr 44), gdzie szybkość wydzielania ciepła zwiększała się wraz z objętością składników niemetalicznych kabli.

Również konstrukcja kabli jednożyłowych o małych średnicach posiadała negatywny wpływ na właściwości ogniowe kabli, co wiąże się z brakiem barier metalicznych w kablu oraz brakiem opancerzenia i powłoki wypełniającej w konstrukcji kabla.

Metaliczny pancerz lub żyła koncentryczna w kablach, tworzy naturalną barierę przed szybkim przenikaniem płomienia do wnętrza kabla, chroniąc go przed zasięgiem rozprzestrzeniania się płomienia (FS) w kierunku jego wewnętrznych warstw. Stąd też kable z żyłami koncentrycznymi wykazywały niższe parametry cieplne i dymowe, takie jak peakHRRav i THR1200s, niż podobne kable bez żadnego opancerzenia (próbki kabli nr 75, 78, 80, 84, 87 i 89).

Analiza TGA i ATR-FTIR potwierdziła brak istotnych różnic między składami chemicznymi powłok zewnętrznych, wypełniających i izolacji kabli poddawanych badaniom zarówno w małej, jak i dużej skali. Stosunkowo niewielkie różnice w składzie izolacji wyjaśniono niejednorodnym rozkładem nieorganicznych wypełniaczy lub różną zawartością wypełniaczy we frakcji polimerowej. Duża ilość niepalnych wypełniaczy zastosowanych w próbkach kabli (głównie zawierających ATH) skutecznie spowodowała zmniejszenie istotnych właściwości ogniowych badanych kabli.

Analiza wpływu rodzaju elementów niemetalicznych kabli stanowi kolejny kluczowy element rozprawy. Im większe stężenie wypełniacza ATH i boranu cynku w niemetalicznych palnych częściach kabla tym korzystniejsze właściwości przeciwpożarowe. Autorka szczegółowo i w wyczerpujący sposób wyjaśniła mechanizmy opóźniające spalanie - co zasługuje na wyróżnienie. Kable nr 69, 70 i 73 zawierające atom chlorowca na bazie związku PVC wydzielały więcej ciepła i dymu niż kable o podobnej konstrukcji (nr 71, 65 i 72) nie zawierające atomu chloru.

W celu określenia wpływu izolacji kabli na możliwość prowadzenia bezpiecznej ewakuacji wykonano oznaczenia głównych toksycznych produktów gazowych tj. CO, CO<sub>2</sub>, HCl, gazowych węglowodorów, w piecu Pursera przy różnych przepływach powietrza w komorze spalania (czyli różnej wentylacji w warunkach pożaru). Badaniom poddano miedziany przewód elektryczny (H07V-U PVC) z izolacją na bazie poli(chlorku winylu) (PVC) stosowany powszechnie w budownictwie oraz jako próbkę referencyjną czysty nieplastyfikowany poli(chlorek winylu) oraz polietylen o niskiej gęstości (najprostszy z polimerów). Plastykowany PVC, używany jako materiał izolacyjny kabli był modyfikowany ogniochronnie wypełniaczem węglanem wapnia (II), wodorotlenkiem glinu (III) lub tlenkiem antymonu (III). Trzykrotnie niższe wydajności CO<sub>2</sub> w różnych warunkach wentylacji uzyskano dla badanego kabla w porównaniu z referencyjnym czystym polimerem nieplastyfikowanym poli(chlorkiem winylu) oraz dwukrotnie niższe w porównaniu z czystym polietylenem, co potwierdza nieznaczny wpływ efektu hiperwentylacji na człowieka podczas palenia się kabli. Natomiast w przypadku wydzielania CO, uzyskano czterokrotnie wyższe wartości wydajności dla badanego kabla w porównaniu z czystymi polimerami. Należy podkreślić, że tego typu badania wykonane na piecu Pursera przy różnych współczynnikach  $\phi$  (0,82;0,42;0,37; 0,27), z analizą parametru FED w Polsce i na świecie są nieliczne. Maksymalną wartość wydajności CO (0,57 g/g) uzyskano w przypadku przepływu powietrza wynoszącego 5 l/min ( $\phi=0,42$ ) i wartość ta zmniejszała się wraz ze wzrostem stopnia wentylacji. Najwyższe wartości FED uzyskano dla przepływu powietrza 10 l/min, gdzie osiągnięto najwyższy FED dla CO. Doktorantka wykazała, że sumaryczna wartość FED zwiększając się wraz ze wzrostem wentylacji otrzymując wartość największą 1,40 (model N-Gas) i 1,49 (model Purser) przy

10 l/min ustawionego przepływu powietrza, a następnie przy przepływie 15 l / min nieznacznie maleje.

W rozdziale 9 pracy Autorka stosując korelacje Pearsona udowadnia brak wyraźnej zależności pomiędzy parametrami ogniowymi a parametrem kablowym  $\chi$ . (rys. 54-55). Choć właściwości ogniowe kabli można jakościowo dobrze opisać parametrami konstrukcyjnymi, takimi jak liczba żył roboczych ( $n$ ), średnica zewnętrzna ( $d_{\text{cable}}$ ) i objętość składników niemetalicznych na metr bieżący kabla zgodnie z EN 50399 ( $V_{\text{combust}}$ ), ich zależność od parametrów pożaru nie wykazały monotoniczności.

Na podstawie badań eksperymentalnych Autorka wykazała zgodność zależności parametru kablowego  $\chi$  a liczbą żył ( $n$ ) dla kabli o liczbie żył mniejszej niż 19. Dla kabli bezhalogenowych o większej liczbie żył zanotowała wzrost wartości szybkość wydzielania ciepła, całkowitego wydzielonego ciepła, całkowitej ilości i szybkości uwalniania dymu wraz ze wzrostem objętości składników niemetalicznych kabli ( $V_{\text{combust}}$ ). Autorka udowodniła, że kable o tej samej wartości parametru  $\chi$  posiadają różne właściwości ogniowe. Potwierdzeniem tej zależności było małe dopasowanie korelacji Pearsona w funkcji parametru kablowego  $\chi$  ( $r_{\text{THR1200s}}$ ,  $\chi = -0,70$  i  $r_{\text{TSP1200s}}$ ,  $\chi = -0,36$ ), które skłoniły Doktorantkę do opracowania nowego empirycznego parametru  $\Omega$  związanego z efektywną objętością palnych elementów niemetalicznych, który dokładniej opisywałby właściwości ogniowe kabli różniących się jedynie liczbą żył. W rozdziale 10 Doktorantka zaproponowała wprowadzenie parametru  $\Omega$ , uwzględniającego stosunek objętości niepalnych elementów niemetalicznych do objętości palnych elementów niemetalicznych kabla oraz efektywną powierzchnię wymiany ciepła w obrębie budowy kabla, do określania i grupowania właściwości ogniowych kabli. Znacznie wyższe bezwzględne współczynniki korelacji Pearson'a (bliskie -1) uzyskano dla parametrów THR1200s i TSP1200s w funkcji parametru  $\Omega$  niż w przypadku parametru  $\chi$ .

Rozdział 11 ukazuje analizę wykorzystania teorii Quintiere'a i wyników otrzymanych z metody kalorymetru stożkowego do modelowania numerycznego procesu spalania kabli. Autorka przedstawiła możliwości zastosowania teorii Quintiere'a w celu uproszczenia i zmniejszenia liczby badań ogniowych kabli, bez negatywnego wpływu na wyniki końcowe jednak niezbędna jest znajomość podstawowych parametrów fizykochemicznych związanych z palnością kabla, jak m. in. przewodność cieplna, całkowita gęstość i pojemność cieplna. Jednakże kable w tym przypadku należy traktować jako materiały stałe kompozytowe. Jako potwierdzenie powyższej zależności ukazano wyniki badań przeprowadzone na kalorymetrze stożkowym przy ustalonych wartościach strumienia promieniowania cieplnego. Otrzymując wytypowane parametry związane z wydzielaniem ciepła i dymu, wartości czasu do zapłonu próbek kabla zasilającego płaskiego z PVC (rys. 61, 62 i 63), wykazano liniową zależność między maksymalną szybkością uwalniania ciepła na jednostkę powierzchni (peak HRR<sub>pua</sub>) a zewnętrznym strumieniem ciepła promieniowania - odpowiednio 10, 20, 30, 40 i 50 kW/m<sup>2</sup> (rys. 61). Otrzymane wyniki badań są zgodne z teorią Quintiere'a tzn. maksymalna wartość HRR<sub>pua</sub> wzrasta wraz ze wzrostem wartości zewnętrznego strumienia ciepła.

Rozdział 12 przedstawia w sposób bardzo skondensowany wnioski ogólne z pracy.

Po szczegółowej analizie powyższych podrozdziałów stwierdzam, iż bardzo obszerne badania zostały zaplanowane w sposób prawidłowy oraz do ich wykonania dobrano właściwe metody badawcze i obliczeniowe. Szkoda, że nie zamieszczono w rozprawie schematu wykonywanych badań. Taki schemat umożliwiłby śledzenie poszczególnych ich etapów. Ze względu na obszerność części badawczej byłoby to z korzyścią dla czytelnika, który czasami gubi się w poszczególnych etapach badawczych.

### 3. Uwagi ogólne i szczegółowe

Oceniając całość rozprawy, należy przede wszystkim podkreślić ogrom pracy, jaką musiała wykonać Autorka. Była to z jednej strony żmudna praca laboratoryjna, wymagająca zapoznania się z różnymi technikami pomiarowymi, zarówno pod względem procedur jak i teorii z tym związanej, co z kolei było konieczne, aby można było prawidłowo zinterpretować wyniki pomiarów. Zróżnicowanie metod badawczych wymagało od Autorki umiejętnego połączenia wiedzy z różnych obszarów. Interpretacja widm FTIR sprawia zwykle trudności nawet doświadczonym badaczom. Dodatkowym problemem był sam materiał badawczy. Dodatki polimerowe użyte do budowy np. izolacji kabli nie były to ściśle zdefiniowane substancje chemiczne, często były to gotowe wyroby handlowe. Z opisem właściwości konstrukcyjno-materiałowymi kabli Autorka poradziła sobie w sposób wystarczający, by wyciągnąć prawidłowe wnioski, co pozwala uznać cel pracy za zrealizowany.

Doktorantka powołując się na referencje dot. wiarygodności i powtarzalności testu zgodne z EN 50399 podjęła się dyskusji dotyczącej niepewności pomiarów w dużej skali. Biorąc pod uwagę metody wykorzystane w pracy techniki w małej skali – ta dyskusja niepewności pomiarów jest mniejsza. Stąd chciałabym, aby Autorka wypowiedziała się w tej sprawie podczas obrony pracy – jaka jest niepewność pomiarowa wyników uzyskanych na kalorymetrze stożkowym badań własnych i literaturowych.

Opisy sposobu wyznaczania wskaźnika FED są wystarczające. Nie wyjaśniono natomiast w zadowalający sposób, jak wyznaczano współczynnik równoważnikowy w badaniach toksyczności produktów spalania w piecu Pursera - dla testowanych izolacji kabli? Czy szacowano go ze składu elementarnego próbek? W jaki sposób Autorka ten parametr obliczyła?

W pracy zauważono kilka błędów:

- na rys. 63 w legendzie wykresów powinno być 10, 20, 30, 40 i 50 kW/m<sup>2</sup> a nie kW,
- na str. 98 Autorka podaje, że badania w piecu Pursera zostały przeprowadzone przy zadanych przepływach powietrza 2, 4, 5, 6, 8, 10 i 15 l/min natomiast np. w tab. 7 przedstawiającej wyniki z badań wynika brak wyników z badań przy przepływach powietrza 4, 6, 8 l/min.
- do badań na kalorymetrze stożkowym użyto próbki ułożonych wyciętych kabli o powierzchni eksponowanej na zewnętrzny strumień ciepła 0,10 na 0,10 m<sup>2</sup> (str. 65). Brak jest podania grubości próbek?
- na rys. 32 i 33 (str. 87) i innych odpowiednio według mnie powinna być podana jednostka objętości [m<sup>3</sup>] bieżący kabla a nie V<sub>combust</sub> [l/m of cable].

#### 4. Ocena osiągnięć zawartych w rozprawie

Tak jak wspomniałam na początku, podjęty przez Doktorantkę problem jest bardzo istotny i aktualny, bowiem dotyczy jakości bezpieczeństwa pożarowego budynków i innych obiektów budowlanych. Stosunkowo mała ilość publikacji naukowych na ten temat powoduje, iż jest to temat wciąż nie rozpoznany, a na pewno ilość kombinacji konstrukcyjno – materiałowych w zastosowanych w systemach kablowych jest bardzo duża co powoduje że wyniki badań ogniowych i innych są trudne do porównania. Normatywny współczynnik  $\chi$  nie w pełni różnicuje kable pod względem bezpieczeństwa pożarowego. Stąd wybór tematu recenzowanej rozprawy doktorskiej był właściwy i uzasadniony.

Osiągnięcie postawionego celu i przedstawienie problemu naukowego wymagało realizacji dużego zakresu pracy, co wiązało się z przeprowadzeniem skomplikowanych i pracochłonnych prac doświadczalnych. Pod względem merytorycznym praca nie budzi zastrzeżeń. Zakres doświadczeń został zaplanowany prawidłowo, odpowiednio do celu pracy. Interpretacja wyników eksperymentów i ich opis świadczą o umiejętności rozwiązywania przez Doktorantkę problemów badawczych.

Zwykonanych badań, autorka wysunęła logiczne wnioski, które potwierdzają również, iż cele pracy zostały zrealizowane.

Do osiągnięć Doktorantki, poza potwierdzeniem tezy postawionej na początku pracy, wynikających z przeprowadzonych badań należy zaliczyć:

- wykazanie zależności, że rozmieszczenie, rodzaj, kształt, liczba żył metalicznych wpływają na sposób przekazywania ciepła w układzie kabla decyduje o właściwościach ogniowych kabli,
- zbadanie, iż zastosowanie żył roboczych miedzianych powoduje obniżenie parametrów ogniowych w porównaniu z kablami z żyłami aluminiowymi (uzyskano do 4 razy niższy parametr  $peakHRR_{av}$  dla kabla z żyłami miedzianymi),
- udowodnienie, że konstrukcja kabla tj. większa liczba żył roboczych i obecność pancerza lub metalicznej żyły koncentrycznej poprawiają właściwości ogniowe, poprzez wytworzenie bariery przed przenikaniem płomienia w głąb wewnętrznych warstw kabla,
- wykazanie, że obecność bariery lub koncentrycznych przewodników obniża parametry pożarowe kabli, takie jak wydzielanie ciepła, wydzielanie dymu, rozprzestrzenianie się ognia i toksyczność gazów pożarowych,
- wykazanie braku wyraźnego związku między parametrami związanymi z właściwościami ogniowymi kabli elektrycznych a standardowym parametrem kablowym  $\chi$  stosowanym dotychczas w doborze próbek do badań w obrębie tej samej rodziny kablowej,
- ustalenie nowego parametru do doboru kabli ze względu na bezpieczeństwo pożarowe związanego z efektywną objętością palnych elementów niemetalicznych  $\Omega$ , który zależy od stosunku objętości niepalnych elementów niemetalicznych do objętości palnych elementów niemetalicznych kabla oraz efektywnej powierzchni wymiany ciepła w obrębie budowy kabla,
- potwierdzenie, że zastosowanie poli(chlorku winylu) jako powłoki i izolacji, a także brak pancerzy w konstrukcji, spowodowało znaczny wzrost długości uszkodzeń na przewodach, co w konsekwencji zwiększa zasięg rozprzestrzeniania się płomienia,
- udowodnienie, że kable bezhalogenowe (LSOH) wytwarzają mniej ciepła, dymu i toksycznych gazowych produktów rozkładu termicznego i spalania niż materiały na bazie plastyfikowanego poli(chlorku winylu) (PVC). Dlatego są bardziej odpowiednie do zastosowań końcowych pod względem zachowania ogniowego całych budynków, w przeciwieństwie do kabli PVC dla których uzyskano 17 razy większą maksymalną wartość  $HRR_{av}$ ,
- potwierdzenie, że wydzielanie drażniącego i toksycznego chlorowodoru podczas spalania kabla elektrycznego jest niezależne od warunków wentylacyjnych i udowodnienie, że produkty reakcji między HCl a miedzią i między HCl i wypełniaczami nieorganicznymi zmniejszyły zawartość HCl w wydzielanym dymie,
- zwrócenie uwagi, że niejednorodny rozkład niepalnych nieorganicznych wypełniaczy lub różna zawartość wypełniaczy i środków zmniejszających palność we frakcji polimerowej powoduje nieregularne zachowanie się kabli podczas pożaru,
- stwierdzenie, że obecność powłoki wypełniającej w kablach wielożyłowych skutkuje zmniejszeniem wartości parametrów spalania ( $peakHRR_{av}$ ,  $THR_{1200s}$ ,  $peakSPR_{av}$  i  $TSP_{1200s}$ ), np. zanotowano maksymalną wartość  $HRR_{av}$  od sześciu do siedmiu razy niższą dla kabli wielożyłowych niż dla kabli jednożyłowych,
- potwierdzenie, że istnieje dobra zgodność między danymi z badań wykonanych w kalorymetrze stożkowym, wyrażonymi za pomocą teorii Quintiere'a, a wynikami eksperymentów z pożarami kabli w skali rzeczywistej, zatem testy ogniowe w skali rzeczywistej można zastąpić zastosowaniem teorii Quintiere'a, co znacznie upraszcza analizę zachowania kabli podczas pożaru.



Oryginalne w pracy jest pogrupowanie złożoności analizy wyników i ich omawianie w 5 kategoriach – rodzaj materiału konstrukcyjnego, kształt i liczba żył roboczych, rodzaj elementów niemetalicznych w układzie badawczym oraz rodzaj bariery koncentrycznej.

Na podkreślenie zasługuje fakt zebrania bardzo obszernej bazy danych pomiarowych, które mogą w przyszłości posłużyć do rewizji metodyki oceny doboru kabli wewnątrz obiektów budowlanych. Autorka sama dochodzi do takiej konkluzji, konstatując, że przedstawiona dysertacja jest pierwszą tak kompleksową oceną zagrożeń związanych z właściwościami konstrukcyjno-materiałowymi kabli. Niewątpliwie przedstawione w pracy dane mogą posłużyć do obliczeń jeszcze innych, ciekawych zależności lub mogą stanowić punkt wyjścia do planowania następnych eksperymentów. Chociażby w ostatecznych konkluzjach pracy iż konieczne są dalsze badania w celu uzyskania większej ilości danych umożliwiających lepsze zrozumienie i wyjaśnienie znaczącego wpływu instalacji elektrycznych na rozprzestrzenianie się płomienia wewnątrz budynku. Mocowanie kabli i rury instalacyjne są zwykle wykonane z palnych materiałów polimerowych (często z PVC) stąd też należy zbadać ich właściwości ogniowe, gdyż mogą stanowić istotne zagrożenia dla bezpieczeństwa pożarowego budynków poprzez zwiększenie zdolności przenoszenia ognia przez ściany, sufity i podłogi.

Na podkreślenie zasługują podsumowania wyników badań w każdym z podrozdziałów, w których Autorka nie tylko podkreśla swoje osiągnięcia, ale dostrzega szereg obszarów, które wymagają jeszcze dopracowania.

Rozprawa doktorska jest dobrze zredagowana, materiał graficzny i tabelaryczny jest czytelny. Recenzowaną dysertację doktorską oceniam bardzo pozytywnie. Większość zawartych w niej danych literaturowych oraz wyników pomiarowych zasługuje na publikację.

## 5. Wniosek końcowy

Podsumowując moją opinię stwierdzam, że recenzowana dysertacja Pani mgr inż. Katarzyny Kaczorek-Chrobak pt.: „Electric cables used in buildings - dependency of fire properties on constructional and material parameters” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje na wysoki poziom wiedzy teoretycznej Kandydatki z dyscypliny inżynieria lądowa i transport a także na umiejętności prowadzenia pracy naukowej przez Kandydatkę. Autorka wykazała, że potrafi samodzielnie rozwiązać problemy naukowe i w sposób logiczny precyzyjny opisać badane zjawiska. Opiniowaną pracę uważam za wyróżniającą się i w całej rozciągłości spełniającą ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim. Wobec tego przedkładam Wysokiej Radzie Naukowej Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie wniosek o przyjęcie opiniowanej rozprawy i dopuszczenie Autorki do publicznej obrony pracy doktorskiej. Jednocześnie, z uwagi na znaczne walory poznawcze i aplikacyjne pracy wnioskuję o jej wyróżnienie.

st. bryg. dr hab. Marzena Półka, prof. uczelni

KIEROWNIK KATEDRY  
Podstaw Procesów Spalania, Wybuchu i Gaszenia  
  
st. bryg. dr hab. Marzena Półka, prof. SGSP

