

st. kpt. mgr inż. Andrzej Krauze

Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa i Ochrony Ludności

Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie

Komputerowe modele rozprzestrzeniania się płomieni i gaszenia wodą, w ocenie skutków rozwoju pożaru oraz skuteczności działania instalacji tryskaczowych

Abstrakt

Równania przepływu płynu, które obrazują rozprzestrzenianie się gorących gazów pożarowych były walidowane i sprawdzone pod względem przyjętych przybliżeń. Niemniej procesy spalania oraz rozkładu termicznego materiałów palnych nadal pozostają zagadnieniem trudnym do modelowania. Przy wykonywaniu analiz komputerowych z zakresu inżynierii bezpieczeństwa pożarowego, często istnieje konieczność oceny wpływu tryskaczy na rozwój pożaru. Obecnie modelowanie efektu gaśniczego tryskaczy wykonuje się najczęściej poprzez modyfikację szybkości uwalniania ciepła z pożaru (czyli krzywej HRR – z ang. *Heat Release Rate*) oraz założenie ograniczonej powierzchni pożaru. W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania zaawansowanych modeli pirolizy i gaszenia wodą do komputerowej oceny wpływu tryskaczy na rozwój pożaru. Omówiono opracowane dotychczas metody modelowania rozprzestrzeniania się płomieni opracowane dla programu Fire Dynamics Simulator.

Słowa kluczowe: rozwój pożaru, szybkość uwalniania ciepła z pożaru, modele pirolizy, metody modelowania rozprzestrzeniania się płomieni

Computer Simulation of Flame Spread and Extinguishing with Water Considering the Effects of Fire Development and Efficiency of Sprinklers

Abstract

The equations of liquid flow describing the fire spread of hot fire gases were validated and tested in respect of assumed approximation. However, the processes of combustion and the thermal decomposition of flammable materials are still very difficult to simulate.

The expected heat release rate (HRR) is the most important element of the fire hazard evaluation in a building. During the computer analysis in the field of fire safety engineering, there

is a need to assess the influence of sprinkler systems on the fire development. At the moment, the simulation of the extinguishing effects of sprinklers is mainly done by the modification of the heat release rate (the curve of HRR) and the limitation of the fire zone. To evaluate the influence of sprinklers on the fire spread, the article presents the possibilities of some practical use of the advanced models of the pyrolysis and extinguishing with water. The methods of the fire spread simulation done for the Fire Dynamic Simulator have been described.

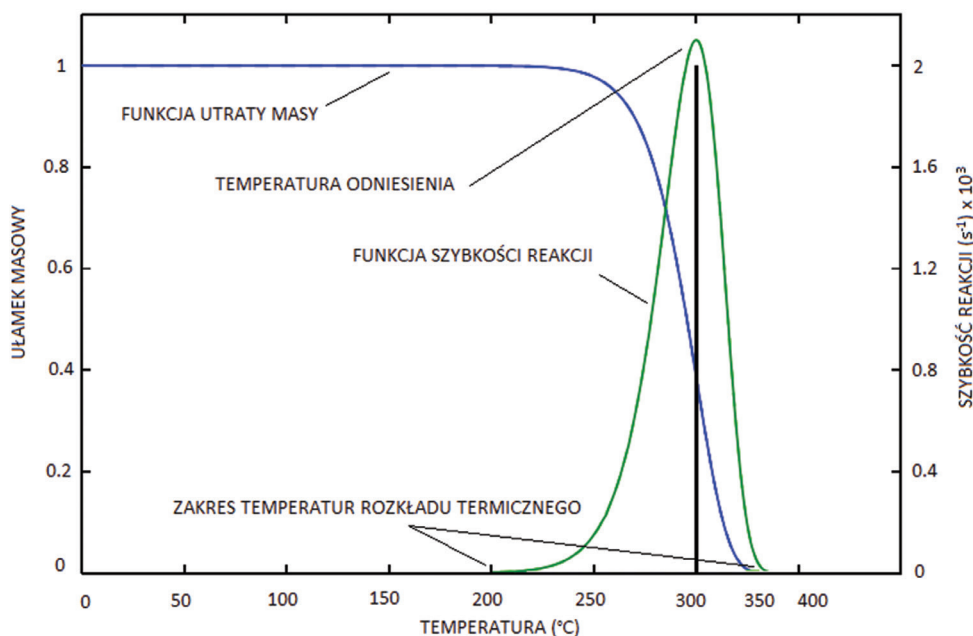
Keywords: fire spread, heat release rate, pyrolysis models, methods of fire spread simulation

Wstęp

Modelowanie komputerowe przy użyciu metody numerycznej mechaniki płynów, jest wykorzystywane przez inżynierów bezpieczeństwa pożarowego przy projektowaniu zabezpieczeń przeciwpożarowych w obiektach budowlanych [1]. Badania z wykorzystaniem kalorymetru stożkowego lub kalorymetru meblowego pozwalają na wyznaczenie szybkości wydzielania ciepła dla danego materiału czy też przedmiotu. Ponadto wiele norm (w szczególności do projektowania wentylacji pożarowej) zawiera wytyczne w zakresie określania przewidywanej mocy pożaru dla konkretnego rodzaju obiektu. Z uwagi na powyższe, powszechnie wykonywane dzisiaj analizy z zakresu inżynierii bezpieczeństwa pożarowego bazują na założeniach tzw. pożaru projektowego (z ang. *design fire*), w którym szybkość uwalniania ciepła (krzywa HRR – z ang. *Heat Release Rate*) jest określana jako warunek wejściowy do symulacji. Niemniej badanie spalania dużych przedmiotów jest kosztowne i pracochłonne, co powoduje, że staje się często niepraktyczne. Jednocześnie krzywe HRR z badań dostępnych w literaturze naukowej mogą być nieodpowiednie dla rozważanego przypadku. Zmiana typu, ilości, rozmieszczenia czy orientacji materiału palnego powoduje istotne różnice w uzyskiwanej krzywej HRR. W celu uniknięcia powyższych trudności oraz dokładniejszej oceny skutków rozwoju pożaru w symulacjach komputerowych, niezbędne jest wykorzystanie modelu rozprzestrzeniania się płomienia na danym materiale palnym. Wspomniany model uwzględnia przewidywanie procesów pirolizy, które są symulowane w oparciu o równania Arrheniusa [2]. Użycie modelu pirolizy powoduje, że krzywa HRR jest wyliczana z symulacji. W takim przypadku możliwe jest również zastosowanie modelu gaszenia, który będzie wpływał na przebieg pirolizy i spalania.

Rozkład termiczny jest związany z ubytkiem masy. Powstałe produkty palne podlegają reakcji utleniania, co wiąże się ze wzrostem intensywności wydzielania ciepła.

Całkowita ilość wydzielonego ciepła, uwalniania podczas reakcji rozkładu termicznego, zależy od ciepła spalania i ciepła reakcji materiału. Rozkład termiczny rozpoczyna się po przekroczeniu określonej temperatury (tzw. temperatura początku rozkładu termicznego), która jest podstawowym parametrem charakteryzującym materiał pod względem odporności cieplnej [3]. Istotnym parametrem jest również zakres temperatur, w których przebiega proces rozkładu termicznego. Na rys. 1 pokazano przykładową reakcję pirolizy w postaci szybkości reakcji i utraty masy w funkcji temperatury.



Rys. 1. Przykładowe przebiegi funkcji utraty masy i szybkości reakcji podczas pirolizy

Źródło: opracowanie własne na podstawie [2]

Przy wykonywaniu analiz komputerowych z zakresu inżynierii bezpieczeństwa pożarowego często zachodzi konieczność oceny wpływu tryskaczy na rozwój pożaru. Zazwyczaj wykorzystuje się uproszczone modele gaszenia, zakładające jedynie modyfikację szybkości uwalniania ciepła z pożaru (czyli krzywej HRR), poprzez założenie ograniczonej powierzchni pożaru. Stosując takie podejście, nie można ocenić jak będzie współpracowała wentylacja oddymiająca z instalacją tryskaczową. Nie jest możliwa analiza skuteczności systemu oddymiania w wysokim atrium wyposażonym w instalację tryskaczową. Podobnie w obiektach magazynowych wyposażonych w wentylację

oddymiającą grawitacyjną nie można zweryfikować wpływu uruchomienia tryskaczy na działanie systemu oddymiania. Nie jest również możliwe sprawdzenie, ile tryskaczy zareaguje i jakie będą straty wynikające z zalania mienia. Ponadto powszechnie stosowane dzisiaj metody modelowania, w których zakłada się tzw. pożar projektowy, nie pozwalają na oszacowanie strat wynikających ze spalania składowanego materiału. Uproszczone sposoby symulowania pożaru nie pozwalają również na ocenę wpływu wentylacji na propagację strefy spalania. Jednakże dotychczasowe metody modelowania rozprzestrzeniania się płomieni opracowane dla programu Fire Dynamics Simulator [2] mogą mieć praktyczne zastosowanie w ocenie bezpieczeństwa pożarowego. Wyniki opisane w pracy [5] umożliwiają przeprowadzenie symulacji komputerowych spalania pianki poliuretanowej przy użyciu programu Fire Dynamics Simulator [6].

1. Dotychczasowy stan badań związanych z modelowaniem pirolizy i spalania pianki poliuretanowej

Aktualnie najbardziej obszernym opracowaniem, które podsumowuje dotychczasowy stan badań oraz podaje nowe metody modelowania numerycznego spalania pianki poliuretanowej jest praca Denissa Pau *Comparative Study on Combustion Behaviours of Polyurethane Foams with Numerical Simulations using Pyrolysis Models* [5]. Celem wspomnianej pracy doktorskiej [5] było zwiększenie obecnego stanu wiedzy w zakresie rozkładu termicznego oraz spalania określonego typu pianki poliuretanowej. Modelowanie spalania pianki poliuretanowej jest bardzo trudne, ponieważ pianka pod wpływem wysokiej temperatury ulega rozkładowi nie tylko na gazowe formy diizocyanianotoluenu (zwanymi wspólnie TDI), ale również na ciekły polioliol. Przebieg rozkładu termicznego pianki przebiega zatem dwuetapowo:

Pierwsza reakcja: Pianka poliuretanowa \rightarrow Frakcja stopiona (Poliol) + Gaz (Izocyanian)

Druga reakcja: Frakcja stopiona (Poliol) \rightarrow Frakcja zwęglona + Gaz (Polyol, H_2CO , H_2O i CH_4)

W pracy [5] przeprowadzono badania laboratoryjne w celu dokładnego określenia parametrów fizycznych określonych typów pianki poliuretanowej, tj.: gęstości, ciepła właściwego, przewodności, ciepła spalania, ciepła reakcji, temperatury odniesienia, szybkości reakcji, a także energii aktywacji. Energia aktywacji, czynnik przedwykładniczy oraz rząd reakcji dla pierwszej i drugiej reakcji zostały wyznaczone przy użyciu termicznej analizy grawimetrycznej (z ang. TGA). Parametry wyznaczone poprzez

aparaturę pomiarową służyły do określenia kinetyki reakcji rozkładu termicznego materiału zgodnie ze wzorem nr 1.

$$\frac{d(m/m_0)}{dt} = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) (m/m_0) \quad (1)$$

gdzie:

m – chwilowa masa próbki,

m_0 – masa początkowa próbki,

A – czynnik przedwykładniczy,

E – energia aktywacji,

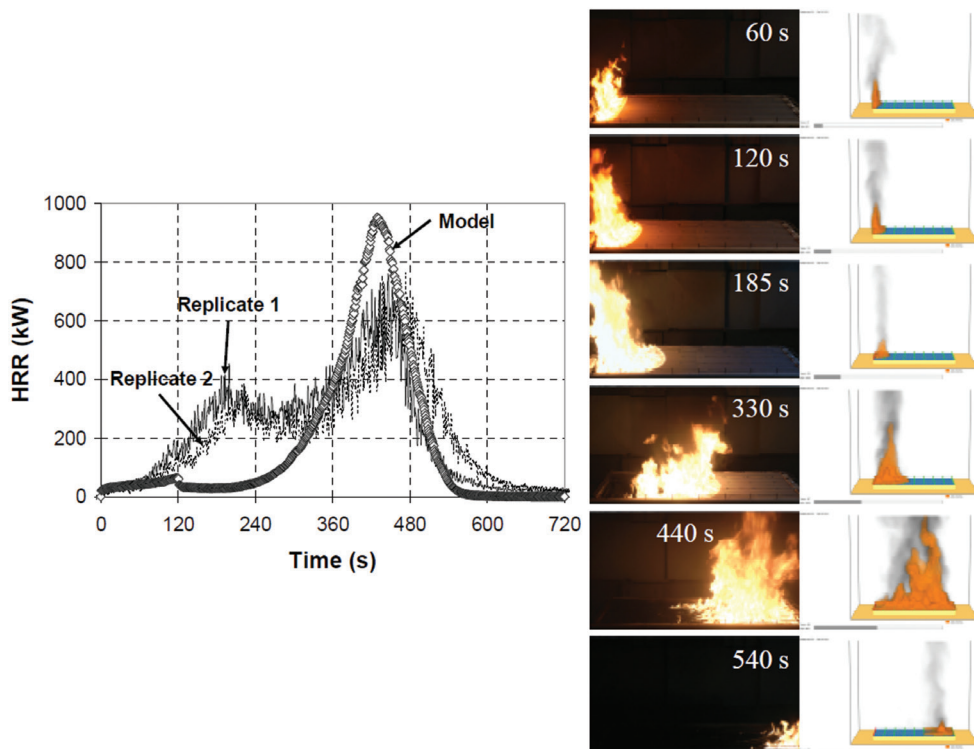
R – stała gazowa,

T – temperatura reakcji

Ciepło reakcji (Δh_r) określono z analizy zmian ciepła i masy próbki, zbadanej metodą skaningowej kalorymetrii różnicowej (z ang. DSC). Właściwości termiczne i fizyczne pianki poliuretanowej, takie jak współczynnik przewodzenia ciepła wyznaczono metodą niestacjonarną (gorącego dysku). Proces spalania próbki pianki poliuretanowej przeprowadzono w kalorymetrze stożkowym. Przebadano procesy spalania oraz rozkładu termicznego konkretnych typów pianki poliuretanowej. Na podstawie przeprowadzonych badań zostały opisane procesy fizyczne i chemiczne, które zachodzą podczas pirolizy oraz zamieszczono zbiór danych opisujących właściwości palne wybranych typów pianki poliuretanowej. Dokładne określenie właściwości fizycznych materiału palnego, takich jak: gęstość, przewodność cieplna, ciepło właściwe, ciepło reakcji, a także temperatura, w której szybkość ubytku masy jest największa (tzw. temperatura referencyjna/odniesienia) jest niezbędna do pełnego wykorzystania istniejących modeli pirolizy i spalania, zaimplementowanych w programie Fire Dynamics Simulator [2].

Efektom końcowym rozprawy [5] jest opracowany schemat wprowadzania danych wejściowych do modelu pirolizy, uwzględniający dwuetapowy przebieg reakcji rozkładu pianki poliuretanowej. Autor publikacji [5] porównał dwie metody określania parametrów reakcji do modelu: bezpośrednie wyznaczanie parametrów materiału z przeprowadzonych badań oraz zaawansowanej metody z wykorzystaniem algorytmów genetycznych. Stwierdzono poprawę dokładności modelu dla symulacji spalania w kalorymetrze stożkowym po wprowadzeniu skorygowanych współczynników. Ostatecznym celem publikacji było porównanie modelu z badaniem w większej skali. Redukcja wartości energii aktywacji E oraz/lub zwiększenie wartości czynnika

przedwykładniczego A skutkuje zwiększeniem intensywności rozkładu termicznego materiału. Autor rozprawy wykazał konieczność zmniejszenia wartości energii aktywacji w modelu tak, aby uzyskać wyniki zbliżone do badania w kalorymetrze meblowym. Ostatecznie przeprowadzono pomyślną walidację modelu, w zakresie otrzymanych krzywych szybkości uwalniania ciepła (z ang. HRR), podczas eksperymentu spalania płyty z pianki poliuretanowej (rys. 2).



Rys. 2. Porównanie krzywej HRR otrzymanej w badaniu oraz w modelu komputerowym

Źródło: [5]

2 Model gaszenia wodą

Program FDS [2] umożliwia wykorzystanie uproszczonego modelu gaszenia wodą, opracowanego na podstawie badań przeprowadzonych przez H.Z. Yu, J.L. Lee oraz H.C. Kunga [7]. Zmniejszenie mocy pożaru w wyniku oddziaływania wody opisane jest następującą zależnością, przedstawioną we wzorze nr 2.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 e^{-k(t-t_0)} \quad (2)$$

gdzie:

\dot{Q} – moc pożaru w czasie t [s],

t_0 – czas aktywacji tryskacza (rozpoczęcie gaszenia) [s],

\dot{Q}_0 – moc pożaru w momencie rozpoczęcia gaszenia (aktywacji tryskacza) [kW],

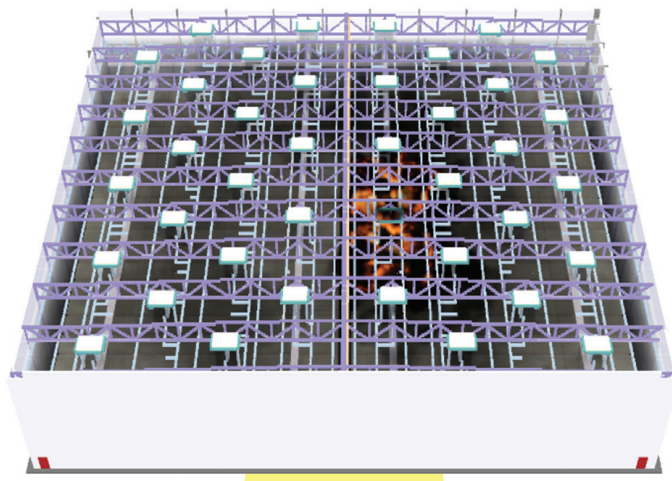
k – stała gaszenia [s].

Stałą „ k ” wyznaczono w oparciu o badania przeprowadzone przez D. Madrzykowski oraz R.L. Vettoriego [8], a także dane opracowane przez Evansa [9]. Obliczeń dokonano dla założenia intensywności zraszania 0,041 [mm/s]. Wyliczoną wartość wprowadzono do programu FDS jako stałą „ a ” wyliczoną zgodnie ze wzorem nr 3.

$$k(t) = am_w(t) \quad (3)$$

gdzie:

m_w – masa wody na jednostkę powierzchni [kg/m²].

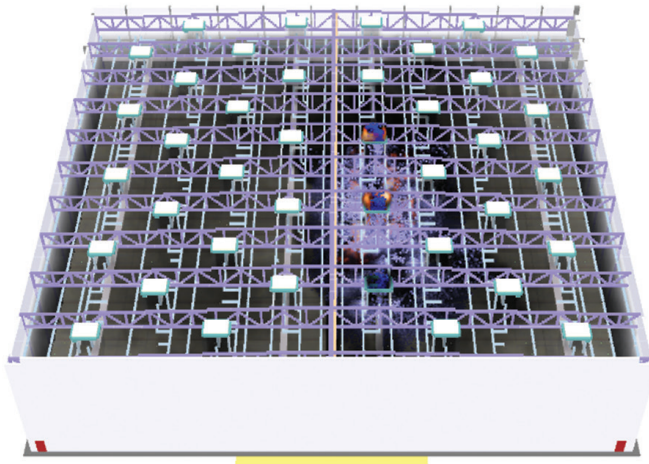


Time: 47.0

Rys. 3. Wizualizacja zaawansowanego modelu propagacji płomieni w hali magazynowej, widok w programie Smokeview

Źródło: opracowanie własne

Program FDS [2] pozwala również na modelowanie interakcji zaawansowanego modelu pirolizy z modelem gaszenia wodą poprzez działające tryskacze. Należy pamiętać, że w chwili obecnej modele zaimplementowane w FDS nie uwzględniają np. formowania filmu wodnego, formowania zwartych strumieni, lokalnego odparowania, absorpcji wody w porowatych materiałach itp. [4, 10]. Dodatkowo istnieją problemy w opisie właściwej liczby kropeł w modelu Lagrange'a [12, 13]. W związku z powyższym, wyniki wzajemnego oddziaływania zaawansowanego modelu pirolizy i gaszenia należy interpretować ostrożnie. Na chwilę obecną są to modele eksperymentalne, a więc nie poparte wystarczającą liczbą badań w pełnej skali.



The 010

Rys. 4. Wizualizacja interakcji modelu pirolizy i gaszenia wodą w hali magazynowej, widok w programie Smokeview

Źródło: opracowanie własne

Wnioski

Inżynierowie bezpieczeństwa pożarowego oraz projektanci urządzeń przeciwpożarowych mogą dzisiaj korzystać z modeli komputerowych, które są pomocne w procesie projektowania. Symulacje z wykorzystaniem narzędzi obliczeniowych pozwalają na optymalizację projektu i dostosowanie zakładanych parametrów do rozpatrywanego

budynku. Z uwagi na powyższe, zasadne jest wykorzystanie analiz komputerowych w celu uzupełnienia projektowania w oparciu o normy. Fire Dynamics Simulator [2] jest jednym z najczęściej wykorzystywanych programów do wspomagania projektowania z uwagi na bezpieczeństwo pożarowe. Niemniej modele zaimplementowane w FDS są zwalidowane i zweryfikowane, przede wszystkim dla równań opisujących procesy zachodzące w fazie gazowej. Procesy rozkładu termicznego, pirolizy i propagacji płomieni na różnych materiałach palnych nie są obecnie wystarczająco dobrze opisane matematycznie [4]. Z tej przyczyny zamiast wykorzystywania zaawansowanych modeli pirolizy i spalania stosuje się tzw. pożary projektowe. W takich przypadkach krzywa HRR jest wcześniej określona przez użytkownika i wprowadzana do modelu jako parametr wejściowy.

Pomimo ciągłych prac prowadzonych nad rozwojem oprogramowania FDS [2], obecnie praktyczne wykorzystanie zaawansowanych modeli rozwoju pożaru jest problematyczne. Główne trudności związane są z brakiem zrozumienia wszystkich procesów fizycznych i chemicznych, które zachodzą podczas pirolizy. Problemem jest również uzyskanie wystarczająco dokładnych opisów właściwości palnych materiałów. Ponadto przebieg reakcji pirolizy jest inny dla różnych materiałów i uzyskanie praktycznych rezultatów wymaga bardzo długiego czasu pracy. W tej chwili nie istnieje ogólnie zatwierdzona metodologia mierzenia parametrów wejściowych. Z tego powodu eksperymenty w pełnej skali są niezbędne do skalibrowania parametrów modelu. Niestety jest bardzo trudno odtworzyć wyniki w różnych wersjach programu, np. wyniki z pracy [5], opracowane dla wersji 5.5.3 programu FDS, nie nadają się do zastosowania w nowszych wersjach programu. Ponadto pewne trudności w modelowaniu pirolizy w FDS przysparza możliwość generacji pojedynczego gazu (paliwa, a także tylko jednej reakcji w linii REAC) emitowanego przez materiał, który ulega pirolizie. Powyższe stanowi problem w przypadku złożonych materiałów. Dodatkowo należy podkreślić, że główne wykorzystanie zaawansowanego modelowania rozwoju pożaru to obecnie analizy popożarowe. Wobec powyższego, rozwój modeli pirolizy jest w głównej mierze determinowany przez potrzeby dochodzeń sądowych. Natomiast sprawy sądowe są zazwyczaj utajnione, dlatego do twórców programu nie docierają informacje o sposobach wykorzystania ich modelu w tym obszarze. Program FDS [2] jest rozwijany głównie dzięki inżynierom zajmującym się projektowaniem obiektów z uwagi na bezpieczeństwo pożarowe, niemniej jednak inżynieria bezpieczeństwa pożarowego w projektowaniu stosuje tzw. pożary projektowe.

Literatura

- [1] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th edition, 2016.
- [2] McGrattan K., Hostika S., McDermott R., Floyd J., Vanella M., NIST Special Publication 1019. Fire Dynamics Simulator (Version 6.7.0), User's Guide, 2018.
- [3] Kim M.E., Dembsey N., *Engineering Guide for Estimating Material Pyrolysis Properties for Fire Modeling*, WPI Project Final Report 28 September 2012.
- [4] McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K., NIST Special Publication 1018-3 Sixth Edition, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, Volume 3: Validation, January 2017.
- [5] Pau D., *A Comparative Study on Combustion Behaviours of Polyurethane Foams with Numerical Simulations Using Pyrolysis Models*, Fire Engineering Research Thesis, Department of Civil and Natural Resources Engineering, University of Canterbury, 2013.
- [6] McGrattan K., Hostika S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K., NIST Special Publication 1019, Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide, 2010.
- [7] H.Z. Yu, J.L. Lee, H.C. Kung, Suppression of Rack-Storage Fires by Water, In Fire Safety Science – Proceedings of the Fourth International Symposium, pages 901–912, International Association For Fire Safety Science, 1994. 89.
- [8] Madrzykowski D., Vettori R. L., *A sprinkler fire suppression algorithm for the GSA engineering fire assessment system*, Gaithersburg, Md.: National Institute of Standards and Technology, NISTIR 4833, 1992.
- [9] Evans D.D., *Sprinkler fire suppression algorithm for HAZARD*, Gaithersburg, Md.: National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5254, 1993.
- [10] McGrattan K., Hostika S., McDermott R., Floyd J., Vanella M., NIST Special Publication 1018-1, Sixth Edition, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model, 26 June 2018.
- [11] Forney G. P., NIST Special Publication 1017-1, Sixth Edition. Smokeview, A Tool for Visualizing, Fire Dynamics Simulation Data, Volume I: User's Guide, 22 June 2018.
- [12] Beji T., Ebrahimzadeh S., Maragkos G., Merci B., *Numerical Modelling of the Interaction Between Water Sprays and Hot Air Jets – Part II: Two-Phase Flow Simulations*, "Fire Safety Journal", 12 January 2018.
- [13] Sikanen T., Vaari J., Hostikka S., *Large scale simulation of high pressure water mist systems*, "WIT Transactions on Engineering Sciences" 2013, Vol 79.