

Skuteczność gaszenia za pomocą systemu mgły wodnej na przykładzie pożaru pianki poliuretanowej

Efficiency of extinguishing with the water mist system on the example of polyurethane foam fire

NATALIA KRAUS-NAMROŻY, DOROTA BRZEZIŃSKA

DOI 10.36119/15.2020.9.5

Dookoła nas coraz więcej przedmiotów składa się z materiałów polimerowych. Ich właściwości podwyższają komfort codziennego życia. Niestety ze względu na swoją budowę są wspaniałymi paliwami. W artykule omówiono budowę pianek poliuretanowych wraz z opisem procesu ich gaszenia. Opisano przeprowadzone dwa badania polegające na gaszeniu próbek z pianki poliuretanowej dyszą mgłową spiralną i tradycyjnym tryskaczem. Artykuł zawiera także opis badań wykonanych przez innych badaczy oraz wnioski z przeprowadzonych badań własnych.

Słowa kluczowe: pożar, instalacja gaśnicza, mgła wodna, tryskacz, pianka poliuretanowa

Around us, more and more objects are made of polymeric materials. Their properties increase the comfort of everyday life. Unfortunately, due to their structure, they are great fuels. This article presents the structure of polyurethane foams with a description of extinguishing them. The article describes two tests carried out, consisting in extinguishing polyurethane foam samples with a spiral water mist nozzle and the traditional sprinkler. The article also contains a description of research carried out by other researchers and conclusions from the own research.

Keywords: fire, fire extinguishing system, water mist, sprinkler, polyurethane foam

Wstęp

Otoczającą nas środowisko przepętnione jest materiałami polimerowymi. Szczególne połączenie ich parametrów mechanicznych z łatwością wytwarzania i małą masą spowodowały, że materiały te używane są w wielu dziedzinach. Niestety, podczas pożaru wysoka palność produktów rozkładu i niska odporność termiczna charakteryzują materiały polimerowe jako pierwszorzędne paliwa.

Aby mogło dojść do pożaru muszą wystąpić trzy podstawowe elementy tzw.



Rys. 1.
Trójkąt spalania

„trójkąta spalania” utleniacz (na ogół tlen), paliwo (materiał ulegający spalaniu) oraz źródło zapłonu. Brak któregoś z powyższych elementów niweluje ryzyko jego powstania oraz ułatwia jego ugaszenie [1,2].

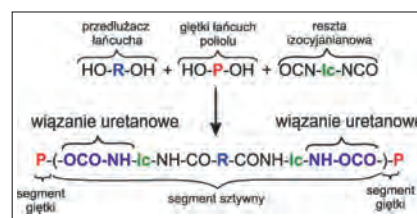
Budowa pianki poliuretanowej

Pianki poliuretanowe znajdują się w grupie polimerów z pogranicza elastomerów oraz plastomerów. Powstają w reakcji dwóch najważniejszych substratów: polioli i izocyjanianów przy udziale katalizatora, środka spęczniającego, środka powierzchniowo czynnego wraz z pozostałymi dodatkami. W celu uzyskania pianek sztywnych o gęstości pozornej w granicach 25-70 kg/m³ dla pianek zamkniętokomórkowych lub 10-12 kg/m³ dla pianek otwartokomórkowych, bądź pianek elastycznych należy zmienić odpowiednio rodzaj mieszaniny i jej skład.

Rysunek numer dwa przedstawia dwa rodzaje wiązań – wiązanie amidowe (uretanowe) oraz estrowe, które obrazują che-

miczny schemat budowy pianek poliuretanowych. Struktura semi-kryształiczna lub bezpostaciowa charakteryzująca grupy izocyjanowe składające się na segmenty sztywne stanowi jeden z rodzajów segmentów łańcucha polimeru. W połączeniu z drugim rodzajem, czyli segmentem giętkim tworzą wiązanie uretanowe. Dzięki długim łańcuchom alifatycznym segmenty giętkie nadają prawidłowe właściwości fizyczne [3].

Podczas pożaru pianek elastycznych następuje ich rozkład termiczny, któremu towarzyszy proces mięknienia, wskutek czego następuje spowolnienie procesu degradacji. Jest to możliwe z uwagi na



Rys. 2.
Schemat łańcucha poliuretanowego [3]

Mgr inż. Natalia Kraus-Namroży; <https://orcid.org/0000-0002-7509-2849>, dr hab. inż. Dorota Brzezińska; <https://orcid.org/0000-0003-4615-4454> – Politechnika Łódzka, WIPOS, Katedra Inżynierii Środowiska. Adres do korespondencji/ Corresponding author: dorota.brzezinska@p.lodz.pl

fakt, że proces mięknięcia pochłaniania pewną część zgromadzonego w pianie ciepła. W przeciwieństwie do pianek elastycznych, pianki sztywne odznaczają się znacznie wyższym stopniem usieciowania. Na skutek tego ciepło rozchodzi się wewnątrz nich dużo szybciej. Co więcej, większa liczba wiązań oraz bardziej zwarta struktura wpływają na stabilność termiczną i temperaturę mięknięcia pianek sztywnych. Wobec tego często podczas pożaru można zaobserwować tworzący się na powierzchni pianki sztywnej węglowy osad [4-9].

W celu przerwania struktury komórkowej i ukształtowania kanalików zezwalających na swobodny przepływ gazów, pianka podlega mechanicznemu zgniataniu. Transport gazów wewnątrz kanalików ma wpływ na właściwości pianek wysokoelastycznych. Mimo, iż powyższe ma doskonały wpływ na właściwości pianki jednakże bardzo pogarsza cechy wpływające na jej palność.

W przypadku pianek wysokoelastycznych ich parametry mechaniczne związane są z przemieszczaniem się gazów wewnątrz kanalików. Tworzenie kanalików polega na fizycznym zgniataniu pianki w celu przerwania struktury komórkowej i utworzenia porów pozwalających na swobodniejszy przepływ gazu. Taka budowa, choć nadaje piance korzystne właściwości użytkowe, wpływa na zwiększenie jej palności. Ze względu na długie kanaliki wewnątrz struktury pianek wysokoelastycznych, ich przenikanie przez tlen jest dużo wyższe w przeciwieństwie do pianek sztywnych. W konsekwencji tego może dojść do powstania tzw. „efektu kominowego” przyspieszającego proces degradacji i migrację strefy spalania wewnątrz pianki wysokoelastycznej [10-15].

Powyższe cechy powodują duże trudności w gaszeniu materiałów zawierających w swym składzie piankę poliuretanową. W otaczającym nas na co dzień środowisku występuje bardzo dużo tego typu przedmiotów powodujących zagrożenie, z którego rzadko zdajemy sobie sprawę.

Stałe urządzenia gaśnicze

Obowiązek stosowania stałych urządzeń gaśniczych reguluje §27 rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych z dnia 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów.

Zgodnie z tym rozporządzeniem stosowanie stałych urządzeń gaśniczych związanych na stałe z obiektem, zawierających zapas środka gaśniczego i urucha-

mianych samoczynnie we wczesnej fazie rozwoju pożaru, jest wymagane w:

- (1) archiwach wyznaczonych przez Naczelnego Dyrektora Archiwów Państwowych;
- (2) muzeach oraz zabytkach budowlanych, wyznaczonych przez Generalnego Konserwatora Zabytków w uzgodnieniu z Komendantem Głównym Państwowej Straży Pożarnej;
- (3) ośrodkach elektronicznego przetwarzania danych o znaczeniu krajowym.

Punkt 2 § 27 ww. rozporządzenia mówi o tym, że zastosowanie stałych samoczynnych urządzeń gaśniczych wodnych jest wymagane w:

- (1) budynkach handlowych lub wystawowych:
 - a) jednokondygnacyjnych, w strefie pożarowej zakwalifikowanej do kategorii zagrożenia ludzi ZL I o powierzchni powyżej 8 000 m²;
 - b) wielokondygnacyjnych, w strefie pożarowej zakwalifikowanej do kategorii zagrożenia ludzi ZL I o powierzchni powyżej 5 000 m²;
- (2) budynkach o liczbie miejsc służących celom gastronomicznym powyżej 600;
- (3) budynkach użyteczności publicznej wysokościowych;
- (4) budynkach zamieszkania zbiorowego wysokościowych [16].

Systemy gaszenia pożarów wymagają koordynacji i powiązania w jedną niezawodną całość wielu technik i urządzeń, spełniając tym samym wymagania scenariuszy pożarowych [17]. Artykuł 20 ust.1 pkt 1 ustawy z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane [18] wskazuje na projektanta jako osobę opracowującą projekt budowlany w sposób zgodny z wymaganiami ustawy, aktualnymi przepisami oraz zasadami wiedzy technicznej. Prawdłowe zaprojektowanie instalacji gaśniczej jest jedną z istotnych cech mających wpływ na skuteczność tych urządzeń. Stałe urządzenia gaśnicze wodne możemy sklasyfikować jako:

- Urządzenia tryskaczowe;
- Urządzenia zraszaczowe;
- Urządzenia mgłowe.

Nie ulega wątpliwości, że woda ma najlepsze właściwości fizyczne służące do tłumienia pożaru. Woda podczas odparowywania zwiększa swoją objętość do 1700 razy, co powoduje rozrzedzenie otaczającego stężenia tlenu i oparów paliwa. Wraz z tworzeniem drobnych kropli, skuteczność tłumienia ognia w wodzie jest dodatkowo zwiększona ze względu na znaczny wzrost powierzchni właściwej kropli wody, dzięki której zwiększona jest absorpcja ciepła. Takie zwiększenie powierzchni właściwej kropli wody przed-

stawiono w tabeli 1, przy objętości wody 0,001 m³.

Tabela nr 1 – Zmiana powierzchni właściwej kropli w zależności od wielkości kropli (objętość wody 0,001 m³) [19]

Wielkość kropli [mm]	6	1	0,1
Całkowita liczba kropli	8,8 × 10 ³	1,9 × 10 ⁶	1,9 × 10 ⁹
Całkowita powierzchnia właściwa [m ²]	1	6	60

Spray wodny, dla którego $Dv_{0,99}$ sumaryczne objętościowe rozpylenie kropli wody jest mniejsza niż 1 mm przy minimalnym projektowanym ciśnieniu roboczym w dyszy mgłowej nazywamy mgłą wodną [20]. W swoich wczesnych badaniach Braidech i Rasbash [21, 22] zidentyfikowali dwa mechanizmy, dzięki którym mgła wodna gasi pożary: wypieranie tlenu i pochłanianie ciepła, wynikające z parowania mgły wodnej w obszarze otaczającym pożar. Przeprowadzone do tej pory badania nie poddały w wątpliwość tych mechanizmów gaśniczych. Ostatnie badania sugerują jednak, że istnieją dodatkowe mechanizmy tłumienia pożaru przy użyciu mgły wodnej. Na przykład Wighus [23, 24] zasugerował, że redukcja oparów paliwa jest kolejnym mechanizmem gaśniczym, wraz z chłodzeniem i rozrzedzeniem płomieni. Ponadto Mawhinney i wsp. [25, 26] zasugerowali, że zmniejszanie promieniowania cieplnego w efekcie kinetycznym mgły wodnej i rozrzedzenie oparów paliwa oraz otaczającej atmosfery przez porywane powietrze stanowią dodatkowe mechanizmy gaszące. Sklasyfikowali oni mechanizmy gaszenia przez mgłę wodną podczas tłumienia ognia jako mechanizmy pierwotne i wtórne [26], które można określić w następujący sposób:

Pierwotne mechanizmy:

- (1) Pochłanianie ciepła
 - chłodzenie płomieni;
 - zwilżanie/chłodzenie powierzchni paliwa.
- (2) Przemieszczenia
 - wypieranie tlenu;
 - rozrzedzanie oparów paliwa.

Mechanizmy wtórne:

- (1) tłumienie promieniowania;
- (2) efekty kinetyczne.

Pochłanianie ciepła – chłodzenie

Mechanizmy chłodzenia przez mgłę wodną służące do tłumienia pożarów można ogólnie podzielić na chłodzenie płomieni i chłodzenie powierzchni paliwa poprzez jego zwilżanie. Chłodzenie

plamieni przez mgłą wodną przypisuje się przede wszystkim przekształcaniu wody w parę, która występuje, gdy duży procent małych kropelek wody dostaje się do źródła ognia i szybko odparowuje. Pożar zgaśnie, gdy adiabatywna temperatura płomienia zostanie obniżona do dolnej granicy, co spowoduje zakończenie reakcji spalania mieszaniny paliwowo-powietrznej [27].

Pożar zostanie również zgaszony, gdy paliwo zostanie schłodzone poniżej punktu pożarowego, usuwając ciepło z powierzchni paliwa, lub gdy stężenie mieszaniny oparów i powietrza powyżej powierzchni paliwa spadnie poniżej granicy łatwopalności. Aby schłodzić powierzchnię paliwa, strumień mgły wodnej musi przedostać się przez strefę płomienia, aby dotrzeć do powierzchni paliwa, a następnie usunąć ciepło z powierzchni paliwa z większą szybkością niż płomień może go dostarczyć. Przyjmuje się, że ciepło jest przenoszone głównie z płomienia na paliwo przez zjawiska, takie jak konwekcja i promieniowanie, podczas gdy chłodzenie paliwa przez mgłę wodną spowodowane jest przede wszystkim przekształceniem wody w parę czyli przemianą fazową.

Zwilżanie oraz schładzanie paliwa przez mgłę wodną zmniejsza również szybkość pirolizy paliwa i zapobiega ponownemu zapłonowi. W przypadku paliw, o niskich temperaturach zapłonu, do schłodzenia powierzchni paliwa potrzebna jest większa objętość rozpylonej mgły wodnej, ponieważ mniej ciepła jest potrzebne do utworzenia oparów paliwa. Ponadto, potrzeba większej ilości kropelek wody, aby zapobiec ponownemu zapaleniu się gorącego, głębiej położonego materiału paliwa. Testy przeprowadzone przez Tamaniniego [28] na przykładzie palącego się drewnianego łóżeczka i drewnianej płyty wykazały, że ryzyko ponownego zapłonu jest większe w przypadku wyższych dawek wody, jeśli rozpylanie zostanie przerwane, gdy tylko płomień zgasną. Wynika to z faktu, że wyższe wartości przepływu wody powodują, że ogień gaśnie szybciej, ale zbyt szybkie jej odcięcie pozostawia paliwo wciąż gorące i nadal postępuje rozpad paliwa wewnątrz.

Wypieranie tlenu

Wypieranie tlenu może wystąpić w dwóch formach [29]. W pierwszej formie (*compartmental scale*) następuje oddzielenie paliwa od otaczającego środowiska poprzez gwałtowne parowanie i rozprężenie drobnych kropelek wody w parę, a co za tym idzie odbieranie ciepła z gorących płomieni i gazów. Rosander i Giselson [30] przeprowadzili bada-

nia wykazujące zmniejszenie stężenia tlenu o około dziesięć procent przy przekształceniu w pomieszczeniu o objętości 100 m³ jedynie 5,5 litra wody.

Druga forma wypierania tlenu (*localized scale*) polega na dotarciu kropelek mgły wodnej do samego paliwa i szybkiego przejścia jej w stan gazowy. Podczas tej przemiany następuje zwiększenie objętości cieczy około 1700 razy, dzięki czemu zostaje zakłócony mechanizm pochłaniania tlenu przez płomień. W rezultacie, gdy opary paliwa zostaną rozrzedzone poniżej dolnej granicy palności mieszaniny paliwowo-powietrznej lub gdy stężenie tlenu niezbędne do podtrzymania spalania spadnie poniżej krytycznego poziomu, ogień zostanie zgaszony.

Para wodna jako środek obojętny w tłumieniu pożaru była szeroko badana. Rosander i Giselson [30] opisać również proces gaszenia ognia poprzez tworzenie pary jako pośredniego środka gaśniczego. Zalecają 35% mieszaninę wody w otaczającym gazie do ugaszenia ognia przez parę wodną. Z analizy modelowania komputerowego Długogórski i wsp. [31] wykazali, że do skutecznego tłumienia wymagane stężenia pary wodnej w mieszaninie łatwopalnych gazów zmieniają się w zależności od temperatury otoczenia i osiągają 36% i 44% dla temperatury otoczenia wynoszącej 100°C i odpowiednio 300°C.

Obniżanie promieniowania cieplnego

Kiedy mgła wodna otacza lub dotyka powierzchnie paliwa, woda może zachowywać się jak termiczna bariera, aby zapobiec dalszemu nagrzewaniu poprzez promieniowanie zarówno palącej się, jak i niepalącej powierzchni paliwa [32-34]. Ponadto para wodna w powietrzu nad powierzchnią paliwa działa jak radiator absorbujący energię promieniowania i ponownie emitujący ją na powierzchnię paliwa ze zmniejszoną intensywnością. Blokowanie promieniowania ciepła przez mgłę wodną wstrzymuje rozprzestrzenianie się ognia i redukuje wzrost oparów paliwa i pirolizy na powierzchni paliwa [35].

Czynniki wpływające na atrakcyjność mgły wodnej

Stwierdzono, że chociaż wszystkie mechanizmy gaszenia przez mgłę wodną są w pewnym stopniu zaangażowane w gaszenie pożaru, tylko jeden lub dwa mechanizmy odgrywają główną rolę [36]. Który z mechanizmów tłumienia jest dominujący, zależy od charakterystyki mgły wodnej, scenariusza pożarowego,

geometrii komory testowej i warunków wentylacji. Wiele innych czynników, takich jak efekt ochrony-parasola, rodza je zastosowanych systemów mgły wodnej (ochrona całkowita lub lokalna) oraz stosowanie dodatków do wody mają istotny wpływ na skuteczność tłumienia pożaru [29, 36, 37].

Zgodnie z obowiązującą w Polsce normą PN-EN 12845 stałe urządzenia gaśnicze – automatyczne urządzenia tryskaczowe – projektowanie, instalowanie i konserwacja, automatyczne urządzenia tryskaczowe projektowane jest w celu wykrycia i ugaszenia wodą pożaru w jego wczesnych stadiach lub w celu utrzymania pożaru pod kontrolą, tak aby jego ugaszenie można było zakończyć za pomocą innych środków [3].

Opis stanowiska

Badanie zostało przeprowadzone w komorze testowej o wymiarach całkowitych L=6058 mm, S=2438 mm, Hw=2500 mm. Komora podzielona została na dwie części. W pierwszej znajdowała się aparatura sterująca, a druga część przeznaczona była do przeprowadzenia pożarów testowych. Mobilny zestaw pompowy wraz ze zbiornikiem na wodę o pojemności 200 l podczas testów znajdował się przed komorą testową. Część komory testowej przeznaczonej do testów pożarowych wyposażona była w niezależny system detekcji, wentylacji mechanicznej oraz system orurowania instalacji gaśniczej. W zależności od rodzaju instalacji montowany był odpowiedni rozpylacz. Rozpylacze zamontowane były na wysokości 2400 mm powyżej podłogi. Fotografie nr 1 i nr 2 przedstawiają widok komory testowej z zewnątrz oraz wewnątrz.



Fot. 1.
Widok komory testowej z zewnątrz

W badaniach użyto pionowej pompy ssąco-tłoczącej o wydajności 30 – 114 l/min. i maksymalnym ciśnieniu 1,58 MPa. Na fotografii nr 3 przedstawiono zespół pomp wraz z 200 l zbiornikiem wchodzącym w skład zespołu pompowego.



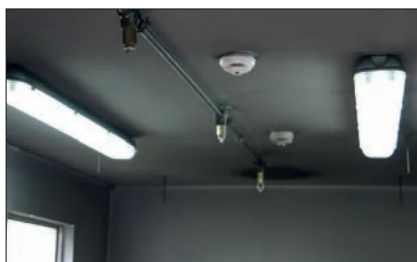
Fot.2.
Widok komory testowej wewnątrz



Fot.3.
Zespół pompowy wraz ze zbiornikiem

Badanie gaszenia pianki poliuretanowej

Chcąc sprawdzić szybkość i możliwość ugaszenia pianki poliuretanowej za pomocą stałych, samoczynnych urządzeń gaśniczych przeprowadzono badania w komorze testowej. Patronem honorowym badań była Politechnika Łódzka, przy współudziale firmy SUPO – Cerber Sp o.o.



Fot.4.
Przewody pod sufitem z kształtkami przygotowanymi do montażu rozpylaczy

Pierwsze badanie zostało przeprowadzone z użyciem tryskacza o następujących parametrach:

- Pozycja – wiszący,
- Średnica przyłącza – DN15,
- Współczynnik wypływu K – 80,
- Szybkość reagowania – reagowanie szybkie,
- Temperatura reagowania – 68 °C,
- Powłoka – chrom,
- Zastosowanie – standardowe.

Na fot.5 pokazano zastosowany tryskacz.



Fot.5.
Tryskacz K80 użyty do badań

Do drugiego badania użyto otwartej dyszy mgłowej spiralnej DMS o następujących parametrach:

- Pozycja pracy – wisząca,
- Średnica przyłącza – DN15,
- Współczynnik wypływu K – 3,
- Materiał – mosiądz,
- Zastosowanie – standardowe.

W obu badaniach użyto próbki o tych samych cechach. Blok pianki poliuretanowej o szerokości i wysokości 30 cm oraz długo-



Fot.6.
Dysza mgłowa spiralna DMS K3 użyta do badań

ści 65 cm umieszczono na metalowych tacach. Za pomocą palnika gazowego podpalono blok z pianki poliuretanowej.

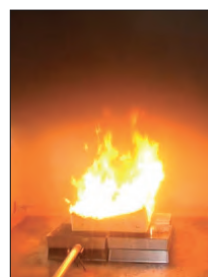
Fot.7.
Próbka użyta do badań



Opis badania nr 1

Próbka pianki poliuretanowej została ustawiona osiowo pod tryskaczem. Gaszenie nastąpi po pęknięciu ampułki w tryskaczu i automatycznym uruchomieniu zestawu pompowego. Blok z pianki poliuretanowej został podpalony za pomocą palnika gazowego. Pożar pianki poliuretanowej powodował wydzielanie bardzo dużej ilości dymu. Ampułka w tryskaczu pękła po 54 s. Fotografia nr 8 przedstawia moment uruchomienia instalacji – jak łatwo zauważyć dym zajmuje połowę wysokości pomieszczenia. Podczas badania wentylacja mechaniczna była wyłączona.

Instalacja działała przez 8:30 min, aż do momentu całkowitego wypalenia próbki – patrz fot. nr10. Pożaru nie udało się ugasić za pomocą działającego tryskacza.



Fot.8.
Test nr 1 w 0:54 min.



Fot.9.
Test nr 1 w 6:15 min.



Fot.10.
Test nr 1 w 8:30 min.

Opis badania nr 2

Próbka pianki poliuretanowej została umieszczona centralnie pod dyszą mgłową DMS K3. Ponieważ dysza DMS K3 jest dyszą typu otwartej, gaszenie nastąpiło po zadziałaniu niezależnego systemu detekcji i automatycznym uruchomieniu zestawu pompowego. Za pomocą palnika gazowego blok z pianki poliuretanowej został zapalony. Instalacja wykryła pożar i uruchomiła zestaw pompowy w 1:38 min. Podczas badania wentylacja mechaniczna była wyłączona.



Fot.11.
Test nr 2
w 1:35 min.



Fot.12.
Test nr 2
w 1:42 min

Fotografia nr 11 przedstawia moment tuż przed uruchomieniem instalacji mgłowej. Pożar został ugaszony w 1:41 min. przeprowadzanego testu. Fotografia nr 12 przedstawia próbkę po ugaszeniu pożaru.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że przy pomocy dyszy mgłowej spiralnej DMS K3 został ugaszony palący się blok pianki poliuretanowej. Przeprowadzone badania dają nowe światło na sposób aplikacji systemów gaśniczych stosujących mgłę wodną. Wyniki badania nr 2 są bardzo obiecujące – mgła wodna generowana przez dyszę mgłową DMS K3 ugasiła pożar próbki z pianki poliuretanowej zaledwie w 3 sekundy.

Nie można jednak zbyt pochopnie i optymistycznie interpretować otrzymanych wyników badań. Należy pamiętać, że pożar w dużej skali mógłby nie być tak łatwy do stłumienia. Nie należy także uogólniać i stawiać tezy, że każdy system mgłowy spowoduje ugaszenie pianki poliuretanowej.

Podczas badania nr 1 tryskacz nie spowodował ugaszenia pożaru bloku pianki poliuretanowej. Badanie wskazuje jedynie na to, że dokładnie w takich warunkach tryskacz nie spowodował stłumienia i należałoby przeprowadzić kolejne badania w innych warunkach, podczas których można byłoby skonfrontować skuteczność tłumienia pożaru z zastosowaniem tryskacza.

Badania potwierdzają, że na skuteczność gaszenia pożarów ma wpływ wiele czynników tj. charakterystyka rozpylacza, scenariusz pożarowy, geometria pomieszczenia, warunki wentylacji oraz rodzaj paliwa. Dlatego podczas sporządzania projektów instalacji gaśniczych tak bardzo ważne jest przeprowadzenie analizy ryzyka pożarowego.

LITERATURA

- [1] Józef Seweryn, Natalia Kraus-Namroży, Wojciech Paják „Wykorzystanie mgły wodnej do polepszania warunków ewakuacji i oddymiania” – Zeszyty Naukowe Szkoły Aspirantów Państwowej Straży Pożarnej w Krakowie: Ochrona dóbr kultury na wypadek szczególnych zagrożeń – wybrane aspekty ewakuacji osób i zbiorów.
- [2] W. Jaskółowski, Toksyczność środowiska pożarowego w budynkach a bezpieczna i skuteczna ewakuacja ludzi, Przegląd Budowlany 1/2012.
- [3] Praca zbiorowa pod redakcją dr inż. Doroty Brzezińskiej, Ochrona przeciwpożarowa budynków produkcyjno-magazynowych, Archmedia, Warszawa 2017.
- [4] P. Kiliaris, C.D. Papaspyrides, Polymers on Fire in Polymer Green Flame Retardants, 2014.
- [5] B.C. Levin, M. Paabo, J.L. Gurman and S.E. Harris, Effects of exposure to single or multiple combinations of the predominant toxic gases and low oxygen atmospheres produced in fires” Toxicological Sciences, 9, (1987).
- [6] Allan D, Daly J, Liggat JJ (2013) Thermal volatilisation analysis of TDI-based flexible polyurethane foam. Polymer Degradation and Stability 98.
- [7] Chun BH, Li X, Im EJ, Lee KH, Kim SH (2007) Comparison of Pyrolysis Kinetics between Rigid and Flexible Polyurethanes. J Ind Eng Chem 13(7).
- [8] Guo X, Wang L, Zhanga L, Lia S, Hao J (2014) Nitrogenous emissions from the catalytic pyrolysis of waste rigid polyurethane foam. Journal of Analytical and Applied pyrolysis 108.
- [9] Rogaume T, Bustamante-Valencia L, Guillaume E, Richard F, Luche J, Rein G, Torero JL (2011) Development of the Thermal Decomposition Mechanism of Polyether Polyurethane Foam Using Both Condensed and Gas-Phase Release Data. Combustion Science and Technology 183(7).
- [10] Z. Wirpsza, Poliuretany, chemia technologia, zastosowanie. Warszawa, WNT, 1998.
- [11] K. Kulesza. Badania nad obniżeniem palności i podwyższeniem stabilności termicznej piankowych tworzyw poliuretanowych, praca doktorska, Politechnika Krakowska, 2003.
- [12] S. Zulfiqar, M. Zulfiqar, T. Kausar, Thermal degradation of phenyl methacrylate-methyl methacrylate copolymers, Polym. Degrad. Stab. 1987.
- [13] T. Gupta, B. Adhikari, Thermal degradation and stability of HTPB-based polyurethane and polyurethaneureas, Thermochim. Acta 2003.
- [14] S. Oprea, Effect of structure on the thermal stability of curable polyester urethane urea acrylates, Polym. Degrad. Stab. 2002.
- [15] S. T. McKenna, T. R. Hull, The fire toxicity of polyurethane foams, Fire Science Reviews (2016).
- [16] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów.
- [17] Józef Seweryn, Zastosowanie Stałych Urządzeń Gaśniczych mgłowych do ochrony obiektów zabytkowych – Konferencja Centrum Naukowo – Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej w Józefowie w 2011 r.
- [18] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane (Dz.U. z 2013r., poz. 1409, z późn. Zm.).
- [19] Z. Liu, A. Kim, A review of Water Mist Fire Suppression Systems – fundamental Studies, Journal of Fire Protection Engineering, 1999.
- [20] Dorota Brzezińska, Renata Ollesz, Natalia Kraus – Namroży, Marek Dziubiński „Stale urządzenia gaśnicze mgłowe w garażach – zasady współpracy z wentylacją strumieniową”, miesięcznik INSTAL nr 5 – 2019
- [21] Braidech, M.M., Neale, J.A., Matson, A.F. and Dufour, R.E., „The Mechanisms of Extinguishment of Fire by Finely Divided Water,” Underwriters Laboratories Inc. for the National Board of Fire Underwriters, NY, p.73, 1955.
- [22] Rasbash, D.J. and Rogowski, Z.W., „Exinction of Fires in Liquids by Cooling with Water Sprays,” Combustion and Flame, Vol. 1, 1957.
- [23] Wighus, R., Aune, P., Drangsholt, G. and Stensaas, J.P., „Full Scale Water Mist Experiments,” International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems, Sweden, 1993.
- [24] Wighus, R., „Engineering Relations for Water Mist Fire Suppression Systems,” Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, 1995.
- [25] Mawhinney, J.R., „Water Mist Fire Suppression Systems: Principles and Limitations,” International Conference on Fire Protection in the HVDC Industry, Vancouver, Canada, 1995.
- [26] Mawhinney, J.R., Długogorski, B.Z. and Kim, A.K., „A Closer Look at the Fire Extinguishing Properties of Water Mist,” Fire Safety Science – Proceedings of Fourth International Symposium, 1994.
- [27] Drysdale, D., „An Introduction to Fire Dynamics,” John Wiley and Sons, NY, 1985.
- [28] Wighus, R., „Active Fire Protection: Extinguishment of Enclosed Gas Fires with Water Sprays,” SINTEF Norwegian Fire Research Laboratory, Trondheim, 1990.
- [29] Mawhinney, J.R. and Back, G.G., „Bridging the Gap Between Theory & Practice: Protecting Flammable Liquid Hazards Using Water Mist Fire Suppression Systems,” Fire Suppression and Detection Research Application Symposium, Orlando, Florida, Feb., 1998.
- [30] Rosander, M. and Giselsson, K., „Making the Best Use of Water for Fire Extinguishing Purposes,” Fire, Oct., 1984.
- [31] Długogorski, B.Z., Hichens, R.K., Kennedy, E.M. and Bozzelli, J.W., „Water Vapour as an Inerting Agent,” Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, 1997.
- [32] Ravigururajan, T.S. and Beltran, M.R., „A Model for Attenuation of Fire Radiation Through Water Droplets,” Fire Safety Journal, Vol. 15, 1989.
- [33] Coppalle, A., „Fire Protection: Water Curtains,” Fire Safety Journal, Vol. 20, 1993.
- [34] Log, T., „Radiant Heat Attenuation in Fire Water Sprays,” Fire Safety Science – Proceedings of Fourth International Symposium, 1996.
- [35] W.Yang, T. Parker, H.D. Ladoucer, R. J. Kee, The interaction of thermal radiation and water mist in fire suppression, Fire Safety Journal, Vol.39, 2004.
- [36] Mawhinney, J.R., Długogorski, B.Z. and Kim, A.K., „A Closer Look at the Fire Extinguishing Properties of Water Mist,” Fire Safety Science – Proceedings of Fourth International Symposium, 1994.
- [37] Back, G.G., „A Quasi-Steady State Model for Predicting Fire Suppression in Spaces Protected by a Water Mist System,” Masters Thesis, University of Maryland, December, 1996.