

Żaneta Paślawska

Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie

Badanie zdolności zwilżających i skuteczności gaśniczej środków pianotwórczych, zwilżających i surfaktantów stosowanych do gaszenia pożarów lasów

Abstrakt

W artykule przedstawiono wyniki badań zdolności zwilżających i skuteczności gaśniczej wodnych roztworów sześciu surfaktantowych koncentratów pożarniczych oraz pięciu surfaktantów. Do badań użyto próbek ściółki leśnej z trzech środowisk – lasu iglastego, liściastego i mieszanego oraz dwóch pyłów drzewnych – bukowego i sosnowego. Badania ściółek przeprowadzono w oparciu o standardy normy NFPA 18, gdzie w symulowanych warunkach pożarowych zdolności zwilżające określane są łącznie ze skutecznością gaśniczą. Zbadano także kinetykę nasycania kapilarnego pyłów drzewnych oraz pyłów z rozdrobnionych ściółek. Wyniki obrazują zależności zdolności zwilżających i skuteczności gaśniczej od stężenia roztworu. Największą skuteczność gaśniczą uzyskano dla ściółki liściastej i mieszanej, natomiast najtrudniej gaszona była ściółka iglasta.

Słowa kluczowe: pożary grupy A, zwilżanie, nasycanie kapilarne, skuteczność gaśnicza

Research of the Wetting Capability and Extinguishing Efficiency of the Foaming Agents, Wetting Agents and the Surfactants Used for Extinguishing Forest Fires

Abstract

The results of research of the wetting capability and extinguishing efficiency of the six solutions made from firefighting surfactant concentrates and also firefighting simple surfactants are presented. To conduct the research, we used forest litter samples from three different environments – from three types of forest: coniferous, leafy,

mixed and two wood dusts – the oak and pine. The litter research was based on the NFPA 18 standards, where the wetting capability in the simulated fire conditions is determined including effectiveness of extinguishing. The research on the kinetics of capillary impregnation of the wood dust as well as the wood dust of crushed litter was carried out. The results illustrate the correlation of the wetting capability and extinguishing efficiency on the dilution concentration. The biggest effectiveness of fire extinguishing was achieved for leaf litter, while the least effectiveness was measured for the coniferous litter.

Keywords: class A fires, wetting, kinetics of capillary, extinguishing efficiency

Wstęp

Lasy w Polsce zajmują powierzchnię około 8,9 mln ha, co przekłada się na lesistość równą 28,4% (dane Instytutu Badawczego Leśnictwa). Z roku na rok zauważalny jest wyraźny wzrost liczby pożarów lasów, nasilający się wiosną i latem, spowodowany głównie warunkami klimatycznymi. Zgodnie z danymi Komendy Głównej Państwowej Straży Pożarnej, w 2015 r. odnotowano łącznie 12 546 pożarów, z czego największą liczbę stanowiły pożary pokrywy gleby, które rozprzestrzeniając się, powodują spalanie ściółki leśnej, krzewów i podrostów [1]. Gaszenie pożarów lasów jest bardzo kłopotliwe dla jednostek ochrony przeciwpożarowej, szczególnie gdy dotyczy pożarów podpowierzchniowych, których lokalizacja może być utrudniona. Niełatwo w takim przypadku dotrzeć do głębiej położonych, tłących się warstw.

Pożary lasów, rozumiane jako pożary materiałów stałych pochodzenia organicznego, zaliczane do grupy A, cechuje duża powierzchnia i szybkie rozprzestrzenianie pożaru w relatywnie krótkim czasie [2]. Gaszenie materiałów stałych odbywa się w dwóch etapach. Pierwszy dotyczy wyeliminowania płomieni, drugi schłodzenia i dogaszania tłącego się materiału [3].

W zależności od rodzaju oraz umiejscowienia pożaru, istnieje wiele metod jego zwalczania. Gasi się je wodą lub wodą z dodatkiem koncentratów surfaktantowych – środków pianotwórczych lub zwilżaczy. W przypadku pożarów w miejscach trudnodostępnych, gdy nie ma możliwości bezpośredniego działania na strefę spalania, stosuje się zrzuty lotnicze środka gaśniczego [4]. Dodatkowo stosowane są metody mechaniczne, np. z wykorzystaniem

tłumic, zasadne w przypadku pożarów występujących na niewielkim terenie przy powierzchni ziemi. Pożary podszytów i podrostów można zwalczać poprzez zasypywanie ziemią strefy spalania.

Podstawowym środkiem gaśniczym przy zwalczaniu pożarów lasów jest woda, która odznacza się bardzo dobrymi właściwościami chłodzącymi. Takie działanie wody powoduje obniżenie temperatury pożaru, co w konsekwencji wpływa na zmniejszenie szybkości procesu pirolizy materiału palnego i przerwanie reakcji spalania. Istnieją jednak pewne ograniczenia skuteczności wody, wynikające z właściwości powierzchniowych materiałów, ich ułożenia i struktury. W kontakcie z materiałami hydrofobowymi, do których zaliczane są niektóre rodzaje ściółki leśnej, woda nie wnika w ich struktury, a także słabo się po nich rozplywa – z uwagi na wysokie napięcie powierzchniowe. Aby wyeliminować wspomniane ograniczenia wody, wprowadza się do niej dodatki w postaci koncentratów surfaktantowych, stosowanych w stężeniach 0,1-1%. Dzięki obniżeniu napięcia powierzchniowego uzyskuje się zwiększenie powierzchni kontaktu roztworów z gaszonym materiałem, a także szybsze wnikanie w przestrzenie porowate gaszonych materiałów – dzięki poprawie zdolności zwilżających [5]. Zastosowanie do gaszenia pożarów lasów zwilżaczy skutkuje nie tylko skróceniem czasu gaszenia, ale również zmniejszeniem zużycia wody. Stopień wykorzystania roztworu w porównaniu z wodą jest znacznie większy, a zatem potrzeba znacznie mniej wody do osiągnięcia takiego samego celu. Wspomniane dodatki do wody, to specjalne zwilżacze pożarnicze oraz standardowe, uniwersalne środki pianotwórcze typu S, stosowane w stężeniach kilkakrotnie niższych od zalecanych do wytwarzania pian.

Inny rodzaj dodatków stanowią retardanty. Są to mieszaniny soli nieorganicznych, najczęściej fosforanu(V) monoamonowego i siarczanu(VI) amonu. Przyczyniają się do zmniejszenia palności materiałów celulozowych na drodze reakcji chemicznych, a tym samym opóźniają rozprzestrzenianie się pożaru [6].

Pomimo braku regulacji prawnych, będących jednocześnie wymaganiami stawianymi zwilżaczom pożarniczym, znanych jest wiele metod pomiaru zdolności zwilżających wodnych roztworów surfaktantów. Jedyną normatywną metodą badawczą w Polsce jest pomiar czasu tonięcia krążka tkaniny bawełnianej w roztworze. Norma ta została opracowana dla przemysłu włókienniczego. Określa metodę oznaczania zdolności zwilżającej

surfaktantu w roztworze, poprzez zanurzenie suchego, wzorcowego krążka tkaniny i określeniu czasu jego zatonięcia. Punktem odniesienia jest czas tonięcia krążka w roztworze wzorcowego surfaktantu – 2-(2-etyloheksylo) sulfobursztynianu sodowego [7]. Metoda ta nie uwzględnia jednak warunków pożarowych.

Ocenę zdolności zwilżających w warunkach zbliżonych do rzeczywistych umożliwiają metody opisane w amerykańskiej normie NFPA 18 [8]. Jedną z nich polega na gaszeniu surowej, odziarnionej bawełny, której zapalenie inicjowane jest wewnątrz warstwy. Jako miarę zdolności zwilżającej przyjęto masę roztworu zatrzymanego w warstwie, zaś skuteczności gaśniczej – pozytywny lub negatywny (ugaszono bądź nieugaszono) efekt gaśniczy. Drugą metodą polega na gaszeniu płytki pilśniowej, także z pomiarami masy wody zatrzymanej w płytce [9].

W literaturze opisywane są również metody pomiaru zdolności zwilżających w stosunku do materiałów porowatych poprzez badanie kinetyki nasycania kapilarnego. Miarą zdolności zwilżającej jest tu masa cieczy wchłoniętej przez materiał w funkcji czasu [10].

1. Właściwości zwilżające wodnych roztworów surfaktantów

Zwilżanie, definiowane jako rozplýwanie się cieczy na powierzchni ciała stałego, związane jest z oddziaływaniem cząsteczek na granicy faz: ciekłej, stałej i gazowej [11]. Jego miarą jest kąt zwilżania, zwany też kątem granicznym, definiowany jako kąt (θ) tworzony z powierzchnią ciała stałego przez kroplę cieczy, w punkcie styku trzech faz. Miarą zwilżalności jest też cosinus kąta zwilżania ($\cos \theta$), którego wartość zależy od napięć międzyfazowych na granicach trzech stykających się faz (1):

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{s-g} - \sigma_{s-c}}{\sigma_{c-g}} \quad (1)$$

gdzie: σ_{s-g} , σ_{s-c} i σ_{c-g} oznaczają napięcia międzyfazowe na granicach faz, odpowiednio: ciało stałe-gaz, ciało stałe-ciecz i ciecz-gaz.

Przyjmuje się, że dobra zwilżalność oznacza wartość $\theta < 90^\circ$, czyli $\cos \theta > 0$. W przypadku wody oznacza to hydrofilowy charakter powierzchni. Dla materiałów hydrofobowych kąt zwilżania wodą $\theta \geq 90^\circ$, czyli $\cos \theta \leq 0$.

Materiały porowate są ciałami o bardzo złożonej strukturze, dlatego też w celu dokładnego zrozumienia procesu ich nasycania cieczami stosuje się uproszczone modele tych ciał. Jednym z najprostszych jest model, w którym przestrzeń porowata stanowi układ przelotowych kapilar, mających identyczną średnicę. Model ten można wykorzystać do opisu procesu nasycania takich materiałów, jak papier, drewno czy materiały włókniste [12]. Różnica ciśnień Δp po obu stronach kapilary napełnionej częściowo cieczą stanowi różnicę ciśnień kapilarnego i hydrostatycznego (2):

$$\Delta p = p_k - \rho \cdot g \cdot l \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

Ciśnienie kapilarne p_k wyrażone jest zależnością (3):

$$p_k = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{r} \quad (3)$$

gdzie:

σ – napięcie powierzchniowe cieczy,

r – promień kapilary,

ρ – gęstość cieczy,

g – przyspieszenie grawitacyjne,

θ – kąt zwilżania,

l – długość odcinka nasyconego cieczą,

α – kąt nachylenia kapilary w stosunku do poziomu.

Proces nasycania siłami kapilarnymi jest możliwy, gdy $\cos \theta > 0$, czyli $\theta < 90^\circ$. W przypadku pionowej kapilary ($\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$), wysokość, na jaką wzniesie się ciecz można wyznaczyć z zależności (2) i (3):

$$l = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{r \cdot \rho \cdot g} \quad (4)$$

W przypadku wąskich kapilar w początkowym etapie nasycania ciśnienie kapilarne znacznie przewyższa hydrostatyczne, które jest w obliczeniach pomijane. Nasycanie kapilary w czasie τ opisane jest zależnością: [10]

$$p = \frac{r \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{2\eta} \quad (5)$$

Z równania (5), nazywanego równaniem Washburne'a, wynika, że szybkość nasycania kapilarnego cieczy jednoskładnikowych jest stała, gdyż wielkości we wzorze nie zmieniają się w czasie [13]. Zależność masy wchłoniętej cieczy od pierwiastka kwadratowego z czasu jest linią prostą. Inaczej jest w przypadku roztworów surfaktantów. Nasycanie kapilarne z ich udziałem nie przebiega zgodnie z równaniem Washburne'a, ponieważ wartości θ i $\cos \theta$, których iloczyn określany jest *napięciem zwilżania*, zmieniają się w trakcie nasycania, co spowodowane jest adsorpcją surfaktantów na materiale stałym i zmianą ich stężenia objętościowego (w cieczy) i powierzchniowego (na granicy faz) [14].

Spadek stężenia surfaktantu według izotermy Gibbsa skutkuje niezmienną wartością napięcia powierzchniowego, aż do uzyskania wartości krytycznego stężenia micelnego (cmc). Do tego momentu w przybliżeniu stała jest także wartość kąta zwilżania. Wstępny etap nasycania przebiega według równania Washburne'a. Dopiero w momencie obniżenia się stężenia surfaktantu poniżej krytycznego stężenia micelnego, wywołanego absorpcją na powierzchni ciała stałego, obserwuje się skokowy spadek szybkości nasycania. Ustala się nowy stan równowagi odpowiadający niższej wartości napięcia zwilżania. [9]

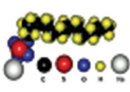
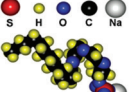
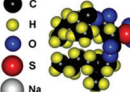
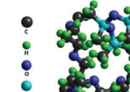
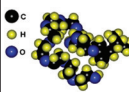
2. Charakterystyka badanych koncentratów surfaktantowych i surfaktantów

W badaniach zastosowano sześć pożarniczych koncentratów surfaktantowych, w tym dwa zwilżacze pożarnicze i cztery środki pianotwórcze oraz pięć surfaktantów. Dwa spośród badanych surfaktantów – dodecylosiarczan sodu (SDS) i lauretoxy(3)siarczan sodu (L-370), są składnikami pożarniczych środków pianotwórczych. Aerosol OT (2-(2-etyloheksylo) sulfobursztynian sodu) jest często stosowanym wzorcem przy badaniach porównawczych zdolności zwilżających. Triton X-100 (X-100) jest składnikiem między innymi preparatów myjących i emulgujących. Surfaktant siloksanowy (SIL) nie ma nazwy zwyczajowej. Użyto go do badań, gdyż spośród pozostałych surfaktantów najsilniej obniża napięcie powierzchniowe wody (do 20 mN/m). Na bazie dostępnych kart charakterystyk oraz informacji producentów w tabelach 1 i 2 przedstawiono właściwości użytych substancji.

a) Charakterystyka surfaktantów stosowanych w badaniach:

Surfaktanty to inaczej substancje powierzchniowo czynne lub związki powierzchniowo czynne, mające zdolność obniżania napięcia powierzchniowego wody. Wynika to z ich charakterystycznej budowy. Ich cząsteczki składają się z części hydrofilowej i hydrofobowej, dzięki czemu tworzą warstwy adsorpcyjną na powierzchniach międzyfazowych woda – powietrze, woda – ciało stałe i woda – ciecz niepolarna. Budowa grupy hydrofilowej jest podstawą klasyfikacji surfaktantów na jonowe i niejonowe. Z kolei jonowe dzielą się na anionowe, kationowe i amfolytyczne.

Tabela 1. Właściwości badanych surfaktantów

Nazwa	Dodecylo- sianecanu sodu	Sulforokanol L-370	Aerosol OT	Surfaktant siloksanowy	Triton X-100
Oznaczenie	SDS	L-370	AOT	SIL	X-100
Rodzaj	anionowy	anionowy	anionowy	niejonowy	niejonowy
Wzór sumaryczny	$C_{12}H_{25}SO_4Na$	$C_{18}H_{37}O_7SNa$	$C_{20}H_{37}NaO_7S$	$CH_3O(CH_2CH_2O)_n - (CH_2)_3Si[OSi(CH_3)_2]_2CH_3$	$C_{33}H_{60}O_{10}$
Struktura chemiczna/ przestrzenna					
Forma	proszek	żel	ciało stałe	ciecz (n = 6–9)	ciecz
Masa cząsteczkowa [u]	288	420	445	$504_{(n=6)}$	624
Gęstość (20°C) [g/cm ³]	1,05	1,1	1,1	1,01	1,06
Zawartość substancji czynnej, [% wag.]	> 99	70	96	90	100
Producent	Carl Roth GmbH & Co. KG	PCC EXOL SA	Alfa AESAR GmbH & Co KG	ABCR GmbH & Co. KG	Carl Roth GmbH & Co.KG

Źródło: materiały informacyjne producentów

b) Charakterystyka pianotwórczych środków gaśniczych i zwilżaczy stosowanych w badaniach:

Pianotwórcze środki gaśnicze to wodne koncentraty zawierające związki powierzchniowo-czynne, rozpuszczalniki organiczne, stabilizatory pian, konserwanty, inhibitory korozji, dające możliwość wytwarzania pian gaśniczych. Zwilżacze pożarnicze służą do poprawy zdolności zwilżających wody. Różnią się od środków pianotwórczych składem jakościowym surfaktantów, brakiem stabilizatorów piany, mogą też nie zawierać rozpuszczalników organicznych.

Tabela 2. Właściwości badanych zwilżaczy i środków pianotwórczych

Oznaczenie koncentratu	Z1	Z2	S1
Typ środka	zwilżacz	zwilżacz	środek pianotwórczy typu S
Temperatura krzepnięcia [°C]	-10	-25	-15 ± 2
pH	6,5–8,5	6,5–8,5	8 ± 1
Zalecane stężenie dozowania [%]	0,5	0,1	3
Gęstość, (20°C) [g/cm ³]	1,00 ± 0,02	1,045–1,055	1,05 ± 0,02

cd. Tabeli 2.

Oznaczenie koncentratu	S2	A	AFFF
Typ środka	środek pianotwórczy typu S	środek pianotwórczy klasy A	środek pianotwórczy typu AFFF
Temperatura krzepnięcia [°C]	-15	-5	-15
pH	6,5–8,5	6,5–9,0	6,5–8,5
Zalecane stężenie dozowania [%]	3	0,1–1	3
Gęstość, (20°C) [g/cm ³]	1,027–1,037	1,03 ± 0,01	1,045–1,055

Źródło: materiały informacyjne producentów

3. Charakterystyka badanych materiałów stałych

Materiał badawczy stanowiły ściółki leśne z lasów liściastego, iglastego i mieszanego oraz ich pyły, a także pyły drzewne: sosnowy i bukowy.

a) Charakterystyka ściółek leśnych:

Próbki ściółek leśnych pobrano z Lasów Otwockich. Suszono je w luźno ułożonych warstwach, w pomieszczeniu w temperaturze 18–22°C i wilgotności powietrza około 40% przez okres 3 miesięcy. Ze ściółek usunięto większe kawałki drewna i gałązki i pokruszono tak, aby nie było w nich fragmentów o wymiarach większych niż 2 cm. Część ściółki zmielono i wyodrębniono z nich frakcję 0,1–0,2 mm, w celu zbadania kinetyki nasycania warstw pyłów. W tabeli 3 zestawiono parametry pyłów badanych ściółek. Gęstość właściwą (ρ) wyznaczono metodą objętościowo-wagową, w kolbie miarowej o objętości 50 cm³, stosując cykloheksan o gęstości 0,779 g/cm³ w temperaturze 20°C, jako ciecz dobrze zwilżającą badane pyły. Gęstość pozorną (ρ_p) w warunkach pomiarów nasycania warstw obliczono jako stosunek masy warstwy do jej objętości. Porowatość (ε) warstw obliczono z zależności (6):

$$\varepsilon = \frac{\rho - \rho_p}{\rho} \quad (6)$$

Wilgotności obu pyłów wyznaczono za pomocą wagosuszarki firmy RADWAG PS 250/4.

Tabela 3. Właściwości badanych ściółek i ich pyłów

Parametr	Ściółka mieszana	Ściółka iglasta	Ściółka liściasta
Gęstość właściwa, [g/cm ³]	1,16	1,15	1,31
Gęstość pozorna warstwy pyłu, [g/cm ³]	0,32	0,32	0,33
Porowatość warstwy pyłu, [-]	0,72	0,83	0,75
Wilgotność, [%]	6,4	6,1	7,2

Źródło: opracowanie własne

b) Charakterystyka pyłów drzewnych:

Przedmiotem badań były pyły drzewne: sosnowy i bukowy, frakcja 100–200 μm . Wybrane właściwości chemiczne obu rodzajów pyłów i ich warstw zestawiono w tabeli 4. Wszystkie parametry mierzono w sposób opisany w punkcie a).

Tabela 4. Właściwości chemiczne badanych pyłów drzewnych i ich warstw

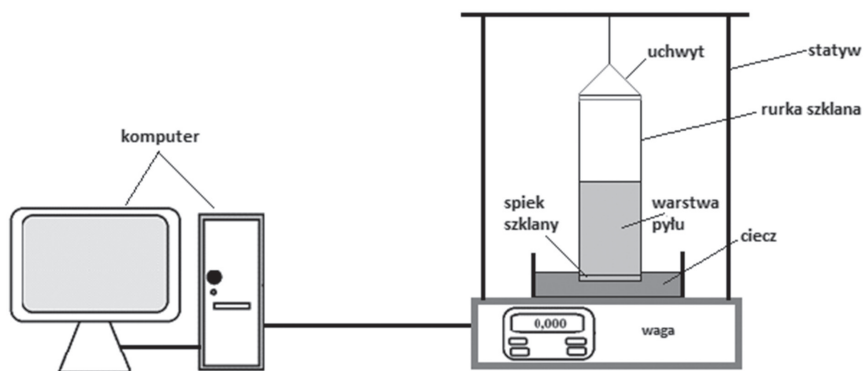
Parametr	Pył bukowy	Pył sosnowy
Gęstość właściwa, [g/cm^3]	1,13	1,20
Gęstość pozorna warstwy, [g/cm^3]	0,22	0,18
Porowatość warstwy, [-]	0,80	0,85
Wilgotność, [%]	6,0	5,3

Źródło: opracowanie własne

4. Metoda badania nasycania kapilarnego pyłów

Badania kinetyki nasycania kapilarnego pyłów drzewnych zrealizowano w szerokim zakresie stężeń, dla surfaktantów: 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125 i 0,0625 g/dm^3 , a dla środków pianotwórczych i zwilżaczy: 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125, 0,0625 i 0,03125% obj. Tak szeroki zakres stężeń podyktowany był próbą określenia wpływu koncentratów surfaktantowych na szybkość nasycania warstw, które traktowano jako modelowe. Nasycanie pyłów ściółek leśnych badano roztworami surfaktantów o stężeniach: 1 i 0,25 g/dm^3 , oraz roztworami środków pianotwórczych i zwilżaczy o stężeniach 0,5 i 0,125% obj. Wychodząc z założenia, że zawartość surfaktantu w koncentracie pożarniczym wynosi średnio około 20% wag., a gęstości koncentratów są bliskie 1 g/cm^3 , stężeniu środka pianotwórczego równemu 0,5% obj. odpowiada stężenie surfaktantu równe 1 g/dm^3 . Roztwory sporządzano w wodzie demineralizowanej o temperaturze $22 \pm 1^\circ\text{C}$. W dniu badania sporządzano roztwór o najwyższym stężeniu, a kolejne wykonywano metodą dwukrotnych rozcieńczeń. Temperatura otoczenia wynosiła $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Jako cieczy wzorcowe w badaniach kinetyki nasycania stosowano wodę demineralizowaną i etanol.

Schemat stanowiska do badania kinetyki nasycania kapilarnego warstw pyłów przedstawiono na rys. 3. Badanie polegało na odważeniu 0,8 g badanego materiału (ściółki leśnej, pyłów drzewnych) i umieszczeniu go w szklanym naczynku pomiarowym. Naczynie pomiarowe stanowiła rurka szklana o średnicy 1,2 cm i wysokości 4 cm, której dno stanowił spiek szklany. Naczynie wraz z pyłem ważono i poddawano wibracjom, aby wysokość warstwy była w każdym pomiarze taka sama około 1,7 cm. W szklanym krystalizatorze umieszczano 25 cm³ cieczy (woda, etanol, roztwory surfaktantów lub koncentratów pożarniczych) i stawiano na wadze rejestrującej ubytek masy w czasie. Naczynie wraz z pyłem kontaktowano z cieczą na głębokość ok 2 mm, w sposób pokazany na rys. 3, tarowano wagę i rozpoczynano pomiar. Masy próbek wyznaczano z dokładnością do 1 mg. Waga rejestrowała masę cieczy w krystalizatorze co 15 s przez 15 min, w programie Pomiar Win. v. 5.2.0. Wyniki opracowywano w programie Excel w postaci zależności masy cieczy wchłoniętej przez warstwę w funkcji czasu.



Rys. 3. Stanowisko do badania kinetyki nasycania kapilarnego

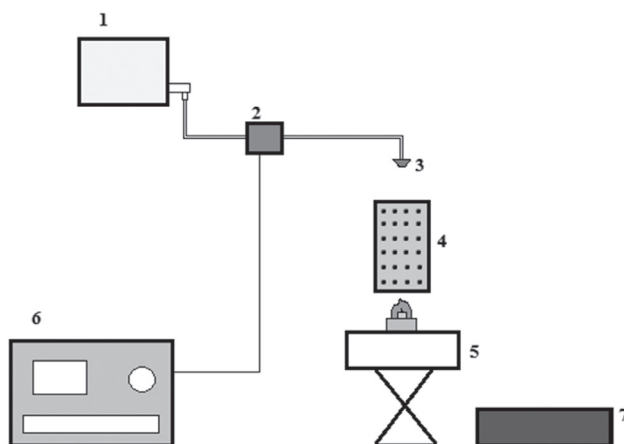
Źródło: opracowanie własne

5. Metoda badania zdolności zwilżającej i gaśniczej

Badanie zdolności zwilżającej i gaśniczej przeprowadzono metodą wzorowaną na normie NFPA 18. W koszyku z perforowanej blachy, ze stali nierdzewnej, o grubości 3 mm umieszczano warstwy ściółki leśnej. Koszyk miał kształt walca, o wysokości 178 mm i średnicy wewnętrznej 114 mm.

Otwory w ściankach koszyka stanowiły około 40% powierzchni. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 4.

Do pojedynczego badania stosowano 35 g ściółki leśnej, którą umieszczano w koszyku, zamontowanym na statywie. Podczas każdego pomiaru ściółka stanowiła warstwę o wysokości około 8 cm. Objętość warstwy ściółki wynosiła około 820 cm³. Pod koszykiem umieszczano tackę z 5 cm³ benzyny ekstrakcyjnej, w celu zainicjowania spalania badanego materiału. Płomień benzyny znajdował się na wysokości ok. 2 cm od dna koszyka. Po wypaleniu się benzyny warstwę pozostawiano na około 1 min w celu swobodnego rozpalenia. Po upływie tego czasu ustawiano pod koszykiem metalową tackę, która przed każdym pomiarem była ważona z dokładnością do 0,1 g i rozpoczynano gaszenie roztworem wypływającym z dyszy ustawionej bezpośrednio nad powierzchnią warstwy ściółki. Czas gaszenia uzależniony był od rodzaju ściółki. W przypadku ściółki iglastej i mieszanej wynosił 30 s, z kolei dla liściastej 15 s. Po zakończonym procesie gaszenia badany materiał wyciągano z koszyka i oceniano skuteczność gaśniczą (ugaszono, bądź nie). Ważono również metalową tackę i obliczano masę cieczy, jaka wyciekła z koszyka, w celu oszacowania ilości roztworu niewykorzystanego do gaszenia. Pomiarów dokonano w trzech powtórzeniach, a wyniki uśredniano.



Rys. 4. Stanowisko badawcze skuteczności gaśniczej

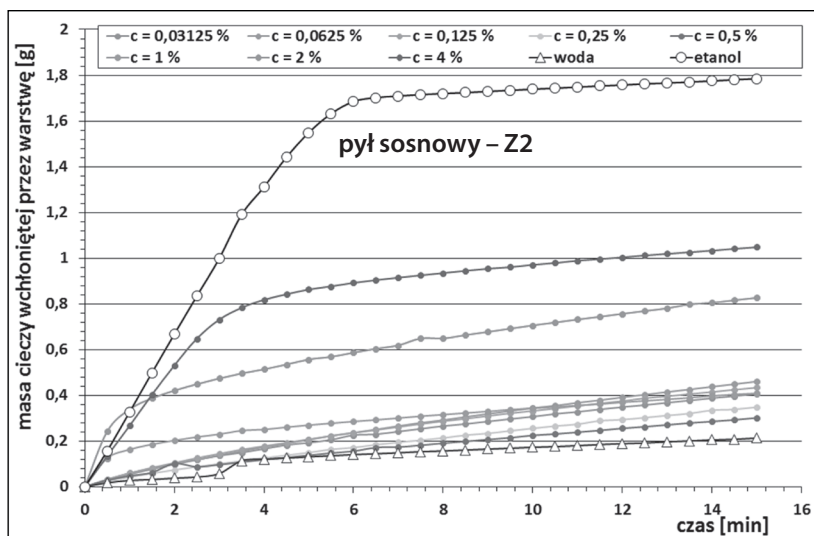
1 – zbiornik z roztworem środka gaśniczego, 2 – pompa elektryczna, 3 – dysza rozpylająca roztwór, 4 – metalowy, perforowany koszyk, 5 – statyw z tacką z benzyną, 6 – zasilacz, 7 – metalowa tacka do zbierania niewykorzystanego roztworu

Źródło: opracowanie własne

6. Wyniki badań

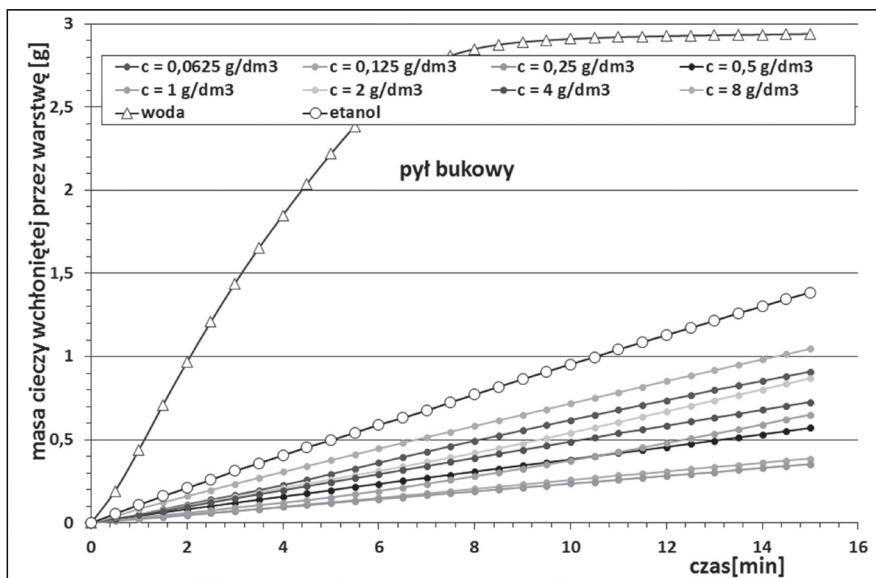
Kinetykę nasycania kapilarnego warstw ściółek leśnych i pyłów drzewnych badano, stosując wodne roztwory sześciu koncentratów pożarniczych oraz pięciu surfaktantów. Pomiaru nasycania pyłów ściółek leśnych przeprowadzono w dwóch stężeniach 0,5 i 0,125% dla koncentratów oraz 1 i 0,25 g/dm³ dla roztworów surfaktantów. Pyły drzewne przebadano w szerszym zakresie stężeń od 0,03125 do 4% oraz 0,0625–8 g/dm³. W charakterze cieczy wzorcowych użyto wody demineralizowanej oraz etanolu, który często stosowany jest jako modelowa ciecz doskonale zwilżająca. Pomiaru nasycania pyłów drzewnych wykonano bez powtórzeń. Chcąc oszacować niepewność wyników, wykonano serię dziewięciu pomiarów nasycania pyłu bukowego roztworem surfaktantu X-100 o stężeniu 8 g/dm³. Obliczone odchylenie standardowe, wyniosło 0,036 g, przy średniej masie końcowej 0,345 g, co stanowi 10% wartości średniej.

Otrzymane krzywe nasycania – masa wchłoniętej cieczy w funkcji czasu – zestawiano oddzielnie dla każdego surfaktantu i koncentratu pożarniczego, dodając, jako linie odniesienia, krzywe nasycania cieczami wzorcowymi. Przykłady najbardziej charakterystycznych krzywych nasycania przedstawiono na rys. 5 i 6. W tabelach 5 i 6 pokazano końcowe masy cieczy wchłoniętych przez warstwy (w ciągu 15 min).



Rys. 5. Krzywe nasycania warstw pyłu sosnowego roztworem zwilżacza Z2

Źródło: opracowanie własne



Rys. 6. Krzywe nasycenia warstw pyłu bukowego roztworem surfaktantu L-370

Źródło: opracowanie własne

Pył sosnowy jest słabo zwilżany przez wodę, ale nie jest hydrofobowy, o czym świadczy, wprawdzie powolne, ale wchłanianie wody przez warstwę. Oznacza to, że kąt zwilżania θ musi być mniejszy od 90° ($\cos \theta > 0$). Najszybciej nasyca warstwy pyłu sosnowego etanol. Nasycenia bliskie maksymalnym osiągnięte zostały w czasie około 6 min. Krzywe nasycenia pyłu sosnowego roztworami zwilżacza Z2 o stężeniach 4, 2 i 1% charakteryzuje duża szybkość nasycenia w początkowym etapie, trwającym od kilkudziesięciu sekund dla roztworów 1 i 2% do około 4 min dla stężenia 4%. W odniesieniu do zastosowań gaśniczych, początkowa szybkość nasycenia może charakteryzować skuteczność gaśniczą roztworu podczas gaszenia pożarów powierzchniowych, gdy przy nadmiarze surfaktantów zachowana jest stałość napięcia powierzchniowego i kąta zwilżania. Drugi, powolny etap nasycenia zachodzi przy niedoborze surfaktantów w warstwie powierzchniowej (w menisku), gdy ustalana jest nowa równowaga związana z kątem zwilżania bliskim 90° . Szybkości nasycenia pyłu sosnowego roztworami zwilżacza Z2 o stężeniach od 0,5 do 0,03125% są podobne i tylko nieco większe od szybkości nasycenia wodą. Podobne zależności można obserwować dla roztworów pozostałych koncentratów pożarniczych.

Badany pył bukowy okazał się silnie hydrofilowy. Świadczy o tym przebieg nasycania wodą (rys. 6). Przy niskich wartościach kąta zwilżania o szybkości nasycania wodą decyduje jej wysokie napięcie powierzchniowe. Druga ciecz wzorcowa – etanol, wnika w warstwy wolniej niż woda, co wynika przede wszystkim z trzykrotnie niższego napięcia powierzchniowego. Nasycanie roztworami surfaktantów (rys. 6 dla L-370) i koncentratów pożarniczych ma charakter prostoliniowy.

Tabela 5. Masy roztworów koncentratów pożarniczych [g], wchłonięte przez warstwy pyłów drzewnych w czasie 15 min

Pył	Stężenie [%]	S1	S2	A	Z1	Z2	AFFF	WODA	ETANOL
bukowy	0,03125	1,95	1,968	0,115	2,071	2,54	1,659	2,939	1,386
	0,0625	2,133	1,844	0,178	2,168	2,181	0,813		
	0,125	0,432	0,546	0,204	0,278	2,246	0,202		
	0,25	0,764	0,363	0,228	2,43	2,618	0,173		
	0,5	0,9	1,595	0,171	2,559	2,259	0,175		
	1	1,51	0,152	0,11	1,513	2,227	0,287		
	2	0,305	0,163	0,401	2,377	2,442	0,183		
	4	0,346	0,274	0,438	2,453	2,037	2,202		
sosnowy	0,03125	0,329	0,269	0,08	0,649	0,407	0,202	0,213	1,785
	0,0625	0,082	0,197	0,107	0,384	0,461	0,352		
	0,125	0,123	0,098	0,108	0,306	0,434	0,086		
	0,25	0,161	0,151	0,222	0,3	0,349	0,102		
	0,5	0,406	0,496	0,152	0,604	0,302	1,115		
	1	0,453	0,095	0,161	0,979	0,409	0,098		
	2	0,366	0,279	0,23	0,778	0,827	0,199		
	4	0,622	0,822	1,67	0,609	1,048	0,762		

Źródło: opracowanie własne

Tabela 6. Masy roztworów surfaktantów [g], wchłonięte przez warstwy pyłów drzewnych w czasie 15 min

Pył	Stężenie [g/dm ³]	AOT	SDS	SIL	L-370	X-100	WODA	ETANOL
bukowy	0,0625	2,038	2,325	0,395	0,91	1,102	2,939	1,386
	0,125	2,333	2,273	0,633	0,387	0,611		
	0,25	2,287	2,032	1,466	0,353	0,525		
	0,5	1,475	1,533	0,251	0,571	0,873		
	1	1,042	0,529	0,276	0,651	1,043		
	2	0,635	0,436	0,608	0,87	1,269		
	4	0,812	0,676	0,24	0,727	1,933		
	8	1,596	0,562	0,207	1,047	1,297		
sosnowy	0,0625	0,253	0,449	0,146	0,128	0,205	0,213	1,785
	0,125	0,246	0,289	0,197	0,138	0,184		
	0,25	0,31	0,312	0,189	0,142	0,23		
	0,5	0,194	0,295	0,117	0,169	0,266		
	1	0,18	0,164	0,175	0,286	0,399		
	2	0,199	0,201	0,265	0,542	0,44		
	4	0,385	0,379	0,245	0,689	0,754		
	8	1,038	2,104	0,259	2,43	1,538		

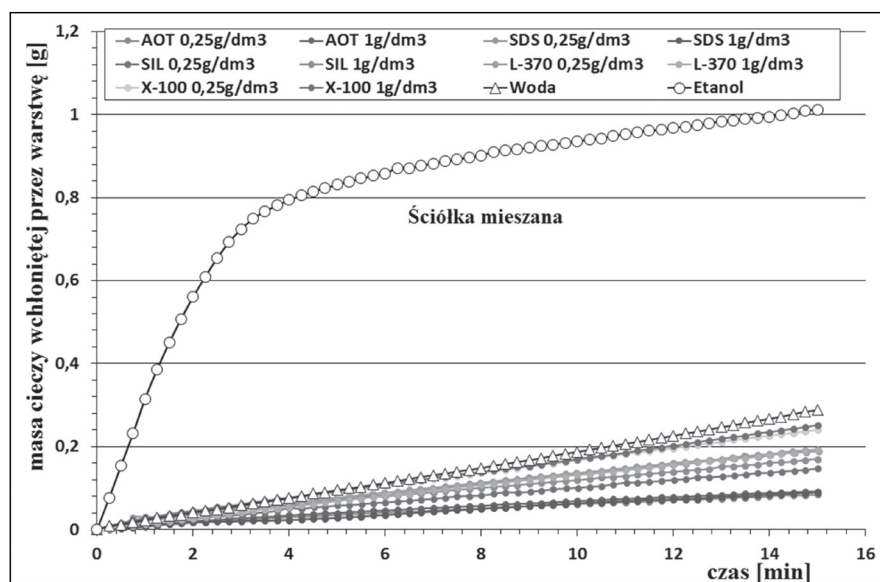
Źródło: opracowanie własne

Badania kinetyki nasycania warstw pyłów miały dostarczyć danych do charakterystyki koncentratów pożarniczych i surfaktantów. Przy stosowaniu koncentratów pożarniczych w charakterze zwilżaczy w postaci roztworów typowe stężenie roztworu to 0,5%. W przypadku pyłu hydrofilowego (buk) najwyższe nasycenie w ciągu 15 min uzyskano dla zwilżacza Z1. Również dla pyłu trudno zwilżanego (sosna) najlepszy okazał się zwilżacz Z1. Wyższą wartość dla koncentratu AFFF trzeba traktować jako błąd grubo (nie wykonywano powtórzeń), co potwierdzają wyniki pomiarów dla stężeń

wyższych i niższych. Środek pianotwórczy A, specjalnie przeznaczony do gaszenia pożarów grupy A, wykazał niskie szybkości nasycania roztworami o stężeniach 0,125–1%. Dopiero dla roztworów o stężeniach 2 i 4% uzyskano wyższe szybkości nasycania. Jednak tak wysokich stężeń nie stosuje się przy podawaniu środków pianotwórczych w postaci roztworów, a piany wytwarza się z roztworów o stężeniach 3%.

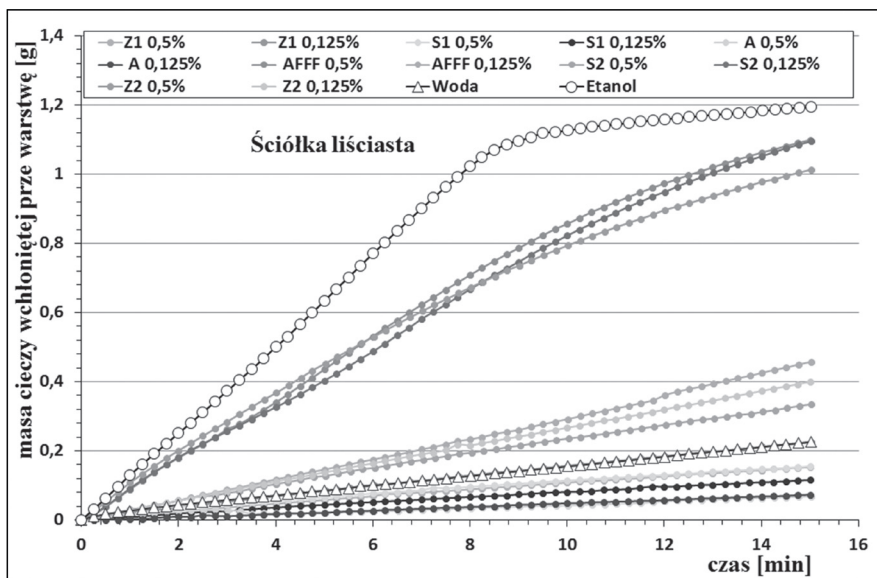
Badanie kinetyki nasycania kapilarnego warstw pyłów ściółek leśnych ograniczono do dwóch stężeń 0,5 i 0,125% w przypadku koncentratów pożarniczych oraz 1 i 0,25 g/dm³ dla roztworów surfaktantów. W charakterze cieczy wzorcowych użyto wody i etanolu, jak podczas nasycania kapilarnego warstw pyłów drzewnych. Przykłady najbardziej charakterystycznych krzywych nasycania przedstawiono na rys. 7 i 8. W tabelach 7 i 8 pokazano końcowe masy cieczy wchłoniętych przez warstwy (w czasie 15 min).

Pył ściółki mieszanej jest dobrze zwilżany wodą, co może świadczyć o tym, iż jest ona hydrofilowa. Dorównuje jej roztwór surfaktantu X-100 o stężeniu 1 g/dm³. Warstwy pyłu najszybciej nasycane są jednak etanolem. Nasycenia bliskie maksymalnemu osiągnięte zostały w czasie ok 3 min, czyli znacznie szybciej niż w przypadku pyłu sosnowego.



Rys. 7. Krzywe nasycania pyłu ściółki mieszanej roztworami surfaktantów

Źródło: opracowanie własne



Rys. 8. Krzywe nasycania pyłu ściółki liściastej roztworami koncentratów pianotwórczych
 Źródło: opracowanie własne

Nasycanie pyłu ściółki mieszanej roztworami surfaktantów i wodą ma charakter prostoliniowy, co może wskazywać na zachowanie w tych warunkach stałej wartości napięcia zwilżania. Charakterystyczna jest niewielka szybkość nasycania warstw roztworem surfaktantu AOT – używanego w różnych testach w charakterze wzorca zwilżalności. Krzywe nasycania pyłu ściółki mieszanej mają zbliżony przebieg do krzywych nasycania warstw pyłu bukowego.

Badany pył ściółki liściastej, podobnie jak pył sosnowy, okazał się słabo zwilżany przez wodę, ale nie można go uznać za hydrofobowy, gdyż wykazywał niewielkie wchłanianie wody przez warstwę. Warstwa pyłu najszybciej nasycana była etanolem. W tym przypadku nasycenia maksymalne osiągnięte zostały w czasie ok. 8 min. Krzywe nasycania pyłu roztworami zwilżacza Z2 o stężeniu 0,5% oraz koncentratu S2 o stężeniu 0,125% charakteryzuje duża szybkość nasycania w początkowym etapie, z kolei szybkości nasycania pozostałymi roztworami koncentratów są podobne i tylko nieznacznie różnią się od szybkości nasycania wodą.

W przypadku pyłu ściółki mieszanej najwyższe nasycenie w czasie 15 min uzyskano dla roztworu koncentratu S2, podobnie jak dla pyłu ściółki słabo

zwilżanej (ściółki iglastej). Roztwór koncentratu S2 wykazał również najwyższe nasycenie wobec ściółki liściastej. Wyższą wartość dla koncentratu AFFF trzeba traktować jako błąd gruby (nie wykonywano powtórzeń), co potwierdzają wyniki pomiarów dla stężeń wyższych i niższych.

Tabela 7. Nasycenie warstw pyłów ściólek leśnych roztworami koncentratów pożarniczych

Rodzaj ściółki	Stężenie [%]	S1	S2	A	Z1	Z2	AFFF	WODA	ETANOL
liściasta	0,5	0,156	0,335	0,068	0,153	1,013	1,099	0,226	1,194
	0,125	0,116	1,095	0,073	0,225	0,4	0,457		
iglasta	0,5	0,185	0,168	0,094	0,219	0,162	0,876	0,21	1,28
	0,125	0,106	0,464	0,062	0,172	0,286	1,286		
mieszana	0,5	0,114	0,125	0,056	0,165	0,158	0,358	0,288	1,012
	0,125	0,223	0,424	0,111	0,199	0,314	0,725		

Źródło: opracowanie własne

Tabela 8. Nasycenie warstw pyłów ściólek leśnych roztworami surfaktantów

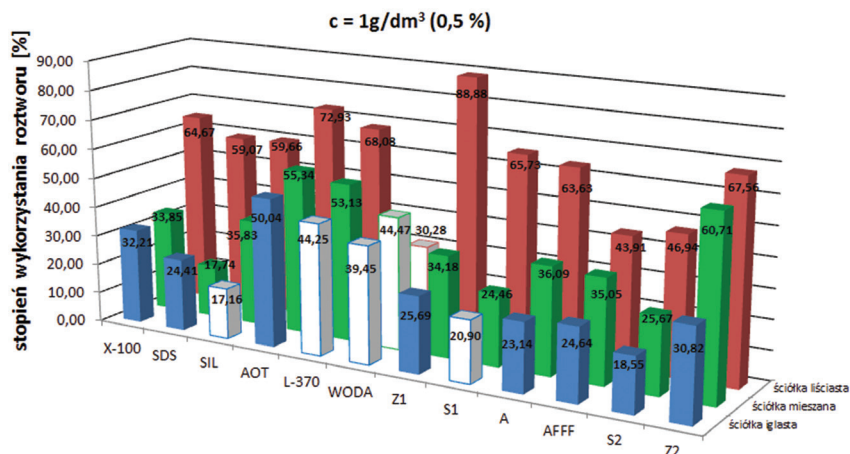
Rodzaj ściółki	Stężenie [g/dm ³]	AOT	SDS	SIL	L-370	X-100	WODA	ETANOL
liściasta	1	0,264	0,203	0,312	0,954	0,751	0,226	1,194
	0,25	0,097	0,126	0,146	0,15	0,29		
iglasta	1	0,124	0,092	0,165	0,271	0,24	0,21	1,28
	0,25	0,094	0,194	0,155	0,336	0,225		
mieszana	1	0,092	0,09	0,17	0,191	0,252	0,288	1,012
	0,25	0,084	0,189	0,147	0,193	0,24		

Źródło: opracowanie własne

Ocenie poddano również skuteczność gaśniczą koncentratów pożarniczych i surfaktantów przy gaszeniu ściólek leśnych. Do badań zastosowano roztwory surfaktantów w stężeniach 1 i 0,25 g/dm³, którym odpowiadały 0,5 i 0,125% stężenia koncentratów pianotwórczych. Oceniane parametry – procentowy stopień wykorzystania roztworu oraz efekt gaśniczy (ugaszono bądź nie) zestawiono na rys. 9 i 10.

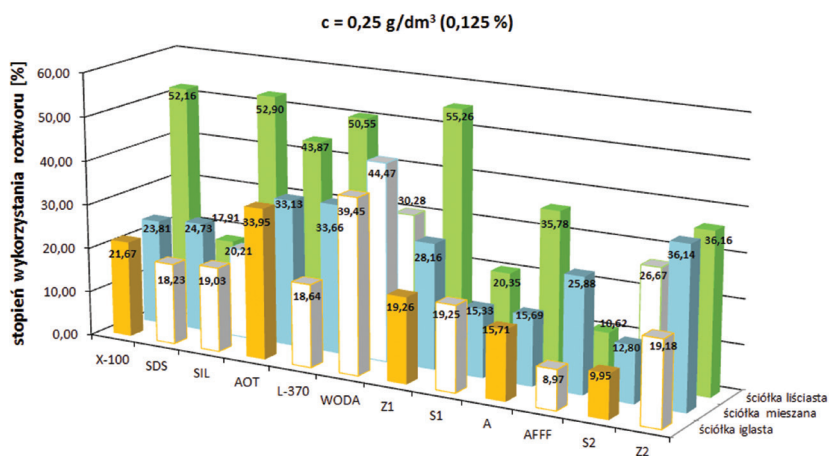
W warunkach pomiarów woda nie gasiła pożaru żadnej ze ściólek. W próbach z roztworami o niższych stężeniach, w ośmiu przypadkach nie

uzyskano ugaszenia. Przy wyższym stężeniu odnotowano tylko trzy przypadki nieugaszenia: dla surfaktantów siloksanowego i L-370 oraz dla środka pianotwórczego S1.



Rys. 9. Stopień wykorzystania roztworów o stężeniach $c = 1 \text{ g/dm}^3$ (dla surfaktantów) i 0,5% (dla koncentratów), podczas gaszenia ściótek leśnych (białe słupki na wykresie oznaczają negatywny efekt gaśniczy)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 10. Stopień wykorzystania roztworu o stężeniach $c = 0,25 \text{ g/dm}^3$ (dla surfaktantów) i 0,125% (dla koncentratów) podczas gaszenia ściótek leśnych (białe słupki na wykresie oznaczają negatywny efekt gaśniczy)

Źródło: opracowanie własne

Najłatwiejsze do ugaszenia okazały się ściółki liściasta i mieszana (rys. 9). Pozytywny efekt gaśniczy osiągnięto dla wszystkich roztworów koncentratów pożarniczych i surfaktantów przy stężeniach 1 g/dm³ surfaktantów i 0,5% koncentratów, a negatywny tylko dla surfaktantu siloksanowego i koncentratu S2 w niższych stężeniach. Potwierdza to celowość stosowania dodatków do wody, zwiększających jej zdolności gaśnicze.

Przy wyższych stężeniach roztworów największy stopień wykorzystania roztworu około 90% podczas gaszenia ściółki liściastej uzyskano dla koncentratu pianotwórczego Z1. W przypadku ściółki mieszanej wyniósł on około 60% dla zwilżacza Z2. Roztwory surfaktantów SIL, L-370 oraz roztwór koncentratu pianotwórczego S1 okazały się mało skuteczne podczas gaszenia ściółki iglastej.

W przypadku niższych stężeń roztworów koncentratów pożarniczych największą skuteczność gaśniczą osiągnięto przy gaszeniu ściółki mieszanej, której nie można było ugasić wodą bez dodatku surfaktantów. Największy stopień wykorzystania roztworu, ok. 55%, uzyskano podczas gaszenia ściółki liściastej dla zwilżacza Z1. Najmniejszą skuteczność gaśniczą uzyskano dla ściółki iglastej, podobnie jak przy stężeniu 1 g/dm³ (0,5%). Nieugaszenie odnotowano dla roztworów surfaktantów SDS, SIL, L-370 oraz koncentratów pianotwórczych S1, AFFF i zwilżacza Z2.

Wnioski

- Nasycanie pyłów drzewnych i pyłów ściółek leśnych przebiega zgodnie z teoretycznym opisem nasycania kapilar.
- Na podstawie krzywych nasycania pyłów można stwierdzić, że pył sosnowy ma charakter częściowo hydrofobowy, ponieważ najslabiej zwilżany jest wodą, w odróżnieniu od pyłu bukowego, przejawiającego właściwości hydrofilowe.
- Roztwory surfaktantów wolniej nasycają warstwy pyłu bukowego niż woda.
- Wstępny etap nasycania może odzwierciedlać zdolności zwilżające roztworu podczas gaszenia pożarów powierzchniowych, z kolei drugi możliwość gaszenia pożarów podpowierzchniowych.
- Badania wykazały, że koncentraty pożarnicze stosowane w roztworach o stężeniu 0,5% pozwalają na zwiększenie skuteczności gaśniczej.

- Badana ściółka mieszana stanowi przykład materiału hydrofilowego, ze względu na dobre nasycanie wodą.
- Zarówno przy stężeniu 1, jak i 0,25 g/dm³ największy stopień wykorzystania roztworu uzyskano podczas gaszenia ściółki liściastej zwilżaczem Z1.
- Uzyskane wyniki pozwoliły sklasyfikować przebadane grupy koncentratów począwszy od najlepiej do najsłabiej zwilżających:

zwilżacze pożarnicze oraz środki pianotwórcze klasy A > środki pianotwórcze typu S > środki pianotwórcze typu AFFF

Literatura

- [1] Rodzaj pożarów lasów w rozbiciu na województwo. Dane statystyczne KG PSP [źródło: www.kgpsp.gov.pl, dostęp: 25.02.2016].
- [2] PN-EN-2:1998/A1:2005 „Grupy Pożarów”.
- [3] Sobolewski M., Zwilżanie materiałów stałych przez roztwory surfaktantów – materiały dydaktyczne, Zakład Środków Gaśniczych i Neutralizujących SGSP, Warszawa 2016.
- [4] Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Instrukcja ochrony przeciwpożarowej lasu, Warszawa 2012.
- [5] Mizerski A., Sobolewski M., Król B., Piany gaśnicze, SGSP, Warszawa 2006.
- [6] Sobolewski M., Wykład SP PK/PC 2015/2016: Środki gaśnicze i neutralizujące, Zakład Środków Gaśniczych SGSP.
- [7] PN-EN 1772:2001, Środki powierzchniowo czynne – Oznaczanie zdolności zwilżania przez zanurzenie.
- [8] NFPA 18 „Standard on Wetting Agents”, 2006 Edition, National Fire Protection Association.
- [9] Mizerski A., Jakubiec J., Janeczek M., Ocena zdolności zwilżających i gaśniczych surfaktantów anionowych i niejonowych w warunkach zbliżonych do praktycznych z wykorzystaniem metod opartych na normie NFPA 18, *Przem. Chem.* 2015, nr 10.
- [10] Mizerski A., Jakubiec J., Badanie kinetyki nasycania kapilarnego tkanin bawełnianych roztworami surfaktantów, *Zeszyty Naukowe SGSP* 2012, nr 43.
- [11] Porycka B., Rakowska J., Badania związane z określeniem aktywności powierzchniowej podstawowych składników środków zwilżających, *Zespół Laboratoriów Badań Chemicznych i Pożarowych CNBOP, Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza* 2009, nr 2.

- [12] Mizerski A., Jakubiec J., Wood dust capillary absorbency kinetics by surfactant solutions, „Wood and Fire Safety”, 7 International Scientific Conference, Strbske Pleso 2012.
- [13] Mizerski A., Neffe S., Investigations of imbibition and wetting properties of aqueous solutions of sodium dodecyl sulfate on porous beds of hydrophilic and hydrophobic materials, *Biul. WAT* 2012, nr 61.
- [14] Mizerski A., Sobolewski M.: Rozszerzona charakterystyka środków pianotwórczych stosowanych w pożarnictwie i ratownictwie chemicznym, *Zeszyty Naukowe SGSP* 2007, nr 35.