



# Możliwości wykorzystania biopaliw roślinnych i zwierzęcych, a w szczególności gliceryny technicznej w kotłach energetycznych

The usability of animal fat and plant-based biofuels, technical grade glycerin in particular, in power plant boilers

dr inż. Henryk KARCZ

dr inż. Karcz Henryk  
Zakład Kotłów i Turbin,  
Wydział Mech.-Energ.  
Politechniki Wrocławskiej  
mgr inż. Folga Krzysztof  
mgr inż. Kosiorek-Herbuś  
Agnieszka  
Energetyczny Recykling  
Odpadów Głównie



## W KILKU SŁOWACH

Rozpalanie kotłów energetycznych opalanych pyłem węglowym odbywa się z reguły przy pomocy paliw ciekłych spalanych przy pomocy palników olejowych różnych konstrukcji. Paliwo do palników doprowadzane jest przy pomocy instalacji zasilającej, wyposażonej w niezbędną armaturę i aparaturę kontrolno-pomiarową. Uruchomienie palnika olejowego realizowane jest za pomocą źródła energii o mocy zapewniającej pewny i skuteczny zapłon paliwa ciężkiego.

Zapłon paliw ciekłych od iskry elektrycznej (220V) możliwy jest tylko wówczas, gdy zapewnione jest odpowiednie rozpylenie paliwa ciekłego. O efektywności rozpylenia decydują głównie własności fizyczne rozpylonej cieczy, a przede wszystkim lepkość kinematyczna. Parametr ten jest bowiem cechą charakterystyczną, zarówno olei roślinnych, tłuszczów zwierzęcych, jak i gliceryny jako produktu odpadowego z przetwarzania olei roślinnych i tłuszczów zwierzęcych. Efekt stabilnego zapłonu i spalania biopaliw uzyskuje się po zapewnieniu niskiej lepkości kinematycznej rzędu  $2\div 5^{\circ}E$  i odpowiedniej organizacji procesu rozpylenia i mieszania z powietrzem na wylocie z dyszy palnika.

## 1. Wstęp

Jako paliwo ciekłe stosowane w dotychczasowej praktyce uruchamiania i opalania kotłów energetycznych, były z reguły lekkie lub cięż-



## SUMMARY

Ignition in coal dust-fired power plant boilers usually takes place when liquid fuels are ignited by various kinds of oil burners. The fuel is supplied through feed pumps furnished with necessary fixtures, as well as control and measurement devices. To ensure that the burners work, a steady and effective source of energy must be provided that is powerful enough to ignite heavy fuel oils.

Ignition of liquid fuels with an electric spark (220V) is possible only if they are atomized properly. The effectiveness of atomization depends primarily on the physical properties of the atomized fluid, in particular its kinematic viscosity, for this parameter is characteristic in animal fat and plant-based fuels, as well as in glycerin that is a byproduct of the processing of animal fat and plant-based fuels. A stable ignition and combustion of biofuels is achieved when the kinematic viscosity is low (that is  $2\div 5^{\circ}E$ ), the fuel is properly atomized and mixed with air in the outlet part of the burner nozzle.

kie oleje ropopochodne. W ostatnich czasach, z uwagi na wymóg produkcji energii ze źródeł odnawialnych, coraz częściej producenci energii elektrycznej sięgają po paliwa biomasowe, nie tylko stałe, lecz również ciekłe pochodzenia ro-



ślinnego, zwierzęcego, oraz produkty odpadowe z ich przetwórstwa chemicznego.

Paliwa te stawiają jednak bardzo wysokie wymagania odnośnie sposobu przygotowania ich do procesu spalania. Muszą być spełnione konkretne wymagania co do ich lepkości, jakości rozpylania, odparowania kropeł, wymieszania par gazów węglowodorowych z powietrzem i utworzenia mieszaniny palnej. O ile zapewnienie lepkości ( $2 \div 3^\circ\text{E}$ ) jest związane wyłącznie z poprawną technologią podgrzewu i zabezpieczeniem przed kawitacją, to zapewnienie pozostałych wymogów a w szczególności właściwego wymieszania paliwa z utleniaczem jest już skomplikowanym procesem fizycznym, który nawet przy stosowaniu bardzo wymyślnych i skomplikowanych technik jest możliwy tylko dla palników o określonej mocy cieplnej.

Dla konwencjonalnych palników ciśnieniowych i dotychczas stosowanych palników dwuczynninkowych granicą poprawnego wymieszania powietrza z olejem, które zapewnia całkowite i zupełne spalanie jest moc palnika rzędu  $5 \div 7$  MW. Powyżej tej granicy niezwykle trudno jest spalać olej roślinny, tłuszcz zwierzęcy lub glicerynę w zimnej komorze kotła bez zjawiska dymienia i separacji kropeł paliwa z płomienia.

Dla zapewnienia stabilnego zapłonu, niezawodnej eksploatacyjnie pracy oraz całkowitego i zupełnego spalania biopaliw, konieczne jest spełnienie następujących wymogów:

- rozpylenie paliwa na krople o bardzo małych rozmiarach równomiernie rozłożonych w przestrzeni wokół palnikowej,
- częściowe odparowanie paliwa wewnątrz głowicy lancy palnika,
- częściowe wymieszanie utleniacza z odparowanym paliwem w bezpośrednim sąsiedztwie głowicy palnika i utworzenie palnej mieszaniny gazowej, która powoduje powstanie czoła frontu płomienia,
- doprowadzenie pozostałej ilości powietrza w strefę czoła frontu płomienia i na obrzeże żagwi, gdzie powstaje stechiometryczny front spalania,
- zapewnienie odpowiedniego dozowania paliwa, czynnika rozpylającego i powietrza do spalania przy zmiennych wydajnościach cieplnych palnika,

- zachowanie odpowiedniej przestrzeni dla formowania płomienia i odprowadzania produktów spalania,
- zastosowanie źródła zapłonowego o niezawodnym, prostym i bezpiecznym działaniu, zapewniającego stabilny i pewny zapłon w każdej sytuacji ruchowej kotła.

Spełnienie poszczególnych wymogów częściowo zależy od usytuowania palnika w komorze kotła, lecz głównie zależy od konstrukcji głowicy palnika oraz od technologii procesu rozpylania i powstania gazowej mieszaniny palnej. W przypadku palników gazodynamicznych mieszanina gazowa składa się głównie z gazów i par węglowodorowych powstałych w wyniku częściowego odparowania paliwa wewnątrz i na zewnątrz głowicy palnika. Palna mieszanina gazowa powstaje w wyniku doprowadzenia części utleniacza pochodzącego z czynnika rozpylającego oraz utleniacza doprowadzonego w bezpośrednie sąsiedztwo głowicy. Właściwości kinetyczne powstałej mieszaniny są powiązane ze składem i koncentracją komponentów gazowych. Zarówno skład jak i koncentracja składników gazowych jest zależna od rodzaju paliwa oraz od miejsca w przestrzeni wokół głowicy. Usytuowanie się czoła frontu płomienia następuje w przestrzeni, w której występuje równowaga normalnej prędkości spalania i prędkości wypływu palnej mieszaniny gazowej. Natomiast przestrzeń, w której powinno się znajdować źródło zapłonowe nie jest równoważne z przestrzenią usytuowania się czoła frontu płomienia. Miejsce umieszczenia źródła zapłonowego (o określonej energii) w którym zapłon mieszaniny gazowej jest najpewniejszy jest zależne od jej właściwości kinetycznych i z reguły przypada na mieszaniny „bogate”. W przypadku gazodynamicznych palników olejowych z wewnętrznym mieszanieniem w których głowica palnika posiada szereg dysz umieszczonych na obwodzie, koniecznym jest znalezienie w przestrzeni wokół palnikowej punktu (umieszczenia źródła zapłonowego) w którym zapłon jest najbardziej skuteczny. Wymaga to szeregu badań doświadczalnych, niezależnie dla każdego rodzaju paliwa, dotyczących ustalenia zarówno odległości źródła zapłonowego od głowicy palnika jak i jego mocy. Z dysz palnika musi wypływać mieszanina gazu węglowodorowego i bardzo małych kropeł paliwa. Do





strefy działania źródła zapłonowego (iskry elektrycznej) doprowadzane są wówczas pary i gazy węglowodorowe, które ulegają zapłonowi, podobnie jak gaz w palniku gazowym. [4÷7]

Częściowe utlenianie gazów węglowodorowych w strefie przedpłomiennej frontu żagwi płomienia zabezpiecza proces spalania paliw ciekłych przed polimeryzacją i krakingiem, a więc przed powstaniem w początkowych strefach płomienia WWA i sadzy, które powodują „kopcenie” płomienia. [8-9]

## 2. Mechanizm rozpylania paliw ciekłych.

Literatura światowa bogata jest w teoretyczne i doświadczalne studia na temat spalania pojedynczych kropeł jednoskładnikowych paliw ciekłych [8-14]. Badania nad spalaniem paliw ciekłych w formie rozpylonej strugi kropeł, czyli w postaci występującej w palnikach olejowych, rozpoczęto stosunkowo niedawno i wydaje się, że droga do zadowalającego poznania kompleksu zjawisk fizykochemicznych występujących podczas spalania strugi kropeł jest jeszcze bardzo daleka. Pomimo, że większość przeprowadzonych w tej mierze badań ma charakter wybitnie eksperymentalny, czynione są próby teoretycznych analiz, sporządzenia fizykochemicznych modeli procesu, matematycznego ich opisanie oraz ich weryfikacji przy pomocy odpowiednio zaplanowanych eksperymentów doświadczalnych. Zasadniczym procesem, na który nakłada się proces spalania, jest proces rozpylania. Proces rozpylania ma fundamentalne znaczenie i stanowi „o takiej a nie innej” jakości spalania. Technika rozpylania paliw płynnych i zjawiska fizykochemiczne towarzyszące temu procesowi, opisano w szeregu monografiach [4-8]. Badania nad rozpylaniem koncentrują się na wyjaśnieniu wpływu sposobu rozpylania, geometrii dyszy, własności fizykochemicznych cieczy, parametrów cieczy i parametrów otoczenia na wielkość i rozkład kropeł [9-11].

Na proces rozpylania nakładają się procesy parowania, wymiany ciepła, wymiany masy i pędu oraz reakcje chemiczne. Wszystkie te zjawiska uzależnione są od szeregu czynników, z których najistotniejsze to [12-15]:

- rozkład średnic kropeł,
- gęstość kropeł,

- względna gęstość kropeł,
- ciepło parowania paliwa,
- temperatura i skład chemiczny ośrodka gazowego.
- Prowadzone prace eksperymentalne mają dwojaki podział:
- badania klasycznych płomieni olejowych,
- badania charakterystycznych parametrów spalania w obszarze wypełnionym mieszaniną rozpylonego paliwa i powietrza.

Podany podział nie jest oczywiście ścisły, gdyż spalanie rozpylonych strug może być realizowane w bardzo różnorodnych okolicznościach. Odpowiada on jednak ogólnie przyjętemu w teorii spalania podziałowi na płomienie dyfuzyjne i kinetyczne.

### 2.1. Niektóre własności fizykochemiczne olei ropopochodnych

Ocena możliwości technologicznych (technicznych) i ekonomicznych stosowania olei ropopochodnych jest istotnie ułatwiona dzięki wystarczającej znajomości ich własności fizycznych i analitycznych (chemicznych). Oleje oferowane na rynku paliwowym – podlegają w zakresie swoich ważniejszych własności postawieniom P.N. Ponieważ w zależności od pochodzenia ropy naftowej, olej surowy zawiera różne ilości parafin, naftalerów, olefinów i aromatów oraz procesy przetwórcze w poszczególnych rafineriach są zróżnicowane, więc skład chemiczny ciężkiego oleju opałowego (mazutu) pochodzącego z różnych źródeł jest zawsze zróżnicowany. Te różnice w składzie chemicznym oleju opałowego odgrywają istotną rolę podczas procesu przygotowania oleju do rozpylania, odparowania, zapłonu i procesu spalania. Jednym z najważniejszych wskaźników oleju ciężkiego jest zawartość popiołu. Zawartość popiołu wpływa bowiem na jego własności fizykochemiczne i kinetyczne. Popiół zawarty w substancji oleju powoduje zanieczyszczenia powierzchni ogrzewalnych i wywołuje korozję urządzeń kotłowych. Popiół zawarty w paliwie jest ciężko oddzielić od fazy ciekłej. Skład popiołu stanowią głównie związki wanadu, sodu oraz różnych metali ciężkich. Za zanieczyszczenia powierzchni ogrzewalnych kotła odpowiedzialna jest przede wszystkim obecność wanadu, sodu oraz siarki.



W mieszaninie z siarczanem sodu, wanad tworzy niskotopliwą eutektykę o punkcie topnienia nawet poniżej 500°C. Rodzaj i grubość warstwy narostu zależy od stosunku wanad-sód. Im więcej jest sodu w stosunku do wanadu, tym grubsza jest warstwa sendymentu. Składniki popiołu oprócz zanieczyszczenia powierzchni ogrzewalnych mogą powodować ich korozję wysoko lub niskotemperaturową. Korozję wysokotemperaturową wywołuje odkład składający się głównie z czystego pięciotlenku wanadu. Korozja niskotemperaturowa powstaje natomiast głównie w wyniku działania kwasu siarkowego których powstaje w wyniku reakcji  $SO_3$  z parą wodną.

Gęstość oleju jest ilościowym wskaźnikiem składu oleju opałowego, zawartości jego najważniejszych składników takich jak węgiel i wodór. Z gęstości można z dobrym przybliżeniem określić stosunek węgla do wodoru – stosunek C/H. Także wartość opałowa w pewnym zakresie jest zależna od gęstości, względnie stosunku C/H, jednak musi w tym przypadku być uwzględniona zawartość siarki.

Lepkość oleju jest jedną z najważniejszych cech fizycznych ponieważ na jej podstawie można różnicować poszczególne gatunki olei. Lepkość – określana też jako ciągliwość lub płynność – określa opór przeciw przesuwaniu względem siebie dwóch sąsiednich warstw substancji – gazu lub cieczy.

Opór w cieczach obniża się ze wzrostem temperatury tzn. że przy wzrastającej temperaturze obniża się lepkość. Przy podawaniu wartości lepkości, podawana jest zawsze temperatura, jako wartość odniesienia.

Jeżeli zmiesza się oleje o różnej lepkości można określić lepkość mieszaniny na podstawie udziału procentowego składników mieszaniny. Wszystkie gatunki olei mineralnych dają się ze sobą mieszać z dobrym skutkiem. Mieszanom natomiast olei mineralnych z olejami syntetycznymi często towarzyszy rozwarstwienie (brak stabilnej mieszaniny). Przeważająca liczba mineralnych olei opałowych jest mieszalna bez dodatkowych zabiegów technologicznych. Tylko podczas mieszania olejów opałowych, które zawierają węglowodory nienasycone – olefiny, częściowo także aromaty – z olejami zawierającymi węglowodory nasycone- parafiny i nafen-

taleny- mogą oddzielać się związki wielowartościowe po dłuższym okresie składowania. Podgrzanie takich mieszanek sprowadza znów układ do roztworu jednorodnego. Najlepiej jest mieszać oleje lekkie o dużej płynności z olejami ciężkimi. Jednakże niemożliwe są mieszaniny olejów mineralnych z syntezowymi, smołami uzyskanymi na bazie węgla brunatnego, kamiennego czy łupków bitumicznych. Z olejów smołowych wydziela się przy tym naftalen i kryształy antracytu, które nawet po podgrzaniu nie przechodzą w roztwór.

## 2.2. Poprawa niektórych własności fizykochemicznych mieszanek olejowo-wodnych.

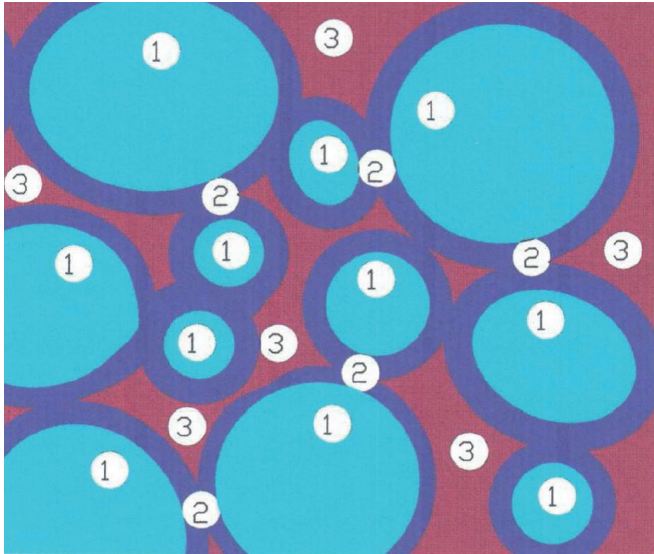
Dla gęsto rozpylonych strug, gdy krople prawie się ze sobą stykają obserwuje się wyraźne oddziaływanie kropeł zarówno w czasie parowania jak i spalania [14-16].

Przeprowadzone badania wykazały, że jest to możliwe do osiągnięcia wtedy, gdy tzw. „pierwotny” rozpad strugi paliwa następuje wewnątrz palnika, szczególnie wtedy, gdy wytwarzana jest mieszanina gazowo-paliwowa (rys.1).

Krople paliwa na drodze z przekroju wylotowego dyszy do strefy czoła płomienia zdążą odparować. Do strefy reakcji dostają się pary i gazy węglowodorowe. Powstały płomień jest bardzo podobny do kinetycznego płomienia gazowego [16-17]. Jest to skutkiem fizykochemicznych własności wytworzonej mieszaniny charakteryzującej się dużą podatnością na rozdrobnienie (małą lepkość), dużą odparowalnością i częściowym wymieszaniem z utleniaczem. Typ płomienia zależy więc zarówno od własności fizykochemicznych wpływającego paliwa jak i od geometrii płomienia i parametrów otoczenia [17].

Poprawę stopnia rozpylania paliw ciekłych, poprawę doprowadzenia tlenu do strefy odparowania oraz poprawę szybkości utworzenia jednorodnej mieszaniny palnej można uzyskać poprzez utworzenie stabilnej mieszaniny olejowo-wodnej. Utworzenie trwałej nierozdzielającej się w czasie mieszaniny o strukturze koloidalnej z zawartością wody do 20% daje możliwość znacznej poprawy w strukturze wymiarowej powstających kropeł oraz bardzo jednorodnego ich rozłożenia w obszarze przylegającym do dyszy palnika.





Rys.1. Struktura mieszaniny olejowo-parowo-wodnej.  
1-olej, 2-woda, 3-para wodna.

Powstałe kropelki oleju posiadają na swej powierzchni warstwę wody (rys. 1), która przy ogrzewaniu ulega odparowaniu, powodując ich mikroeksplozję. Takie dodatkowe rozdrabnianie kropeł wzmacnia proces odparowania oleju na skutek wzrostu powierzchni parowania. Para wodna wywiera również katalityczny wpływ na spalanie oleju [18-19].

W czasie wylotu z dyszy palnika nie ma ciągłości strugi oleju. Wydostają się na zewnątrz krople oleju powleczone warstwą wody, krople wody i cząsteczki pary wodnej. Pod wpływem temperatury czoła frontu płomienia następują mikroeksplozje kropełek wody w wyniku których w przestrzeni wokół dyszy znajduje się wyłącznie para wodna. Eksplozji ulegają również krople oleju poprzez mikroeksplozję warstewki filmu wodnego, na skutek dużej różnicy temperatury parowania mazutu i wody.

W czasie przegrzania cząstek pary wodnej na skutek wysokiej temperatury frontu płomienia, przebiega częściowa dysocjacja cząstek  $H_2O$  z powstaniem rodnika OH, który spełnia rolę katalizatora w reakcji spalania CO, aromatycznych węglowodorów wielopierścieniowych (WWA) i cząstek sadzy.

Obecność cząstek pary wodnej zwiększa emisyjność płomienia w zakresie widma widzanego, przez co zwiększa się współczynnik promieniowania płomienia (obecność gazów trójatomowych) a tym samym stopień przekazywania ciepła z płomienia do powierzchni ogrzewalnych.

### 3. Mechanizm parowania i powstawania mieszaniny palnej podczas spalania paliw ciekłych.

Mechanizm zapłonu i spalania paliw ciekłych można podzielić na następujące stadia:

- nagrzew i parowanie
- termiczne rozłożenie par i wstępne utlenianie
- tworzenie palnej mieszaniny gazowej
- zapłon i spalanie mieszaniny gazowej

Stadia te powiązane są ze sobą zarówno w czasie jak i w przestrzeni.

Przy spalaniu paliw ciekłych w zależności od ich własności fizycznych i chemicznych możliwe są dwa zasadnicze mechanizmy:

- Pierwszy mechanizm obejmuje spalanie paliw lekko odparowujących takich jak benzol, benzyny, nafta i oleje lekkie, których odparowanie i wymieszanie z utleniaczem przebiega w specjalnych podkomorach, z których podawane są powstałe mieszaniny gazowe do komór spalania (silniki spalinowe) [6].
- Drugi mechanizm obejmuje spalanie ciężkich paliw ciekłych, które nie ulegają wstępnemu odparowaniu. Do paliw tych należą ciężkie ropopochodne oleje opałowe: mazut, gudron i smoła, oraz paliwa biomasowe takie jak oleje roślinne, tłuszcze zwierzęce i paliwa odpadowe takie jak gliceryna. Ciężkie paliwa ciekłe podawane do palników nie ulegają z reguły przed wylotem z dyszy palnika wcześniejszemu odparowaniu [9,12,19].

Krople rozpylonego oleju wprowadzane do komory paleniskowej, poruszając się jako zawiesina w strumieniu gazu odparowują i zamieniają się w gaz węglowodorowy. Wytworzona mieszanina gazowa, gdy posiada odpowiednio wysoką temperaturę, ulega zapłonowi, powodując powstanie frontu płomienia. Jednakże przestrzeń pomiędzy frontem płomienia a przekrojem wylotowym dyszy palnika powinna mieć taką formę geometryczną i posiadać takie warunki aerodynamiczne, aby panująca w niej temperatura była niższa od temperatury krakingu paliwa będącego zarówno w fazie ciekłej (nieodparowane krople) jak i w fazie gazowej. Jeżeli proces krakingu rozpocznie się w fazie ciekłej wówczas, z paliwa wtrąca się węgiel w postaci koksu, a gdy przebiegać będzie w fazie gazowej, wówczas powstanie sadza. Liczba i wielkość czą-

stek sadzy emitowanych z płomienia jest tym wyższa im gorsze jest rozpylenie, większa jest lepkość, wyższy jest stosunek C/H i więcej jest związków aromatycznych oraz im większy jest strumień spalane go paliwa [20-23].

Ponadto stwierdzono, że formowaniu się sadzy w płomieniu towarzyszą inne składniki węglowodorowe, a przede wszystkim wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) [5,12,18,22].

Niektóre z nich są wybitnie rakotwórcze (np. fluoren, pirenn, benzo (a)piren). Osadzone na sadzy wnikają głęboko w system respiracyjny organizmu żywego, stanowiąc dla nich niebezpieczne zagrożenie.

Krople paliwa znalazły się w wysokotemperaturowym ośrodku nagrzewają się do temperatury wrzenia, charakterystycznej dla ciśnienia ośrodka. Odparowanie następuje z całej powierzchni kropli. Kropla zostaje otoczona parami węglowodorowymi, do których dyfunduje tlen z otoczenia. Wokół kropli pomiędzy warstwą mieszanki bogatej i ubogiej powstaje mieszanka gazowa zdolna do zapłonu i spalania. Wokół kropli powstaje front płomienia, który dokładnie stabilizuje się pomiędzy górną i dolną granicą zapłonu. Ponieważ temperatura frontu jest znacznie wyższa od temperatury ośrodka, po zapłonie szybkość parowania znacznie rośnie.

W warunkach ustalonych, proces spalania charakteryzuje się dwoma wzajemnie powiązаныmi procesami: parowaniem paliwa na skutek ciepła otrzymywanego z frontu i spalaniem parowo-tlenowej mieszanki w pobliżu powierzchni kropli. Przy ustabilizowanym procesie spalania, szybkość parowania i szybkość spalania powinny być równe. W przypadku zachowania jakiegokolwiek równowagi między oboma procesami, sumaryczny efekt procesu może prowadzić w różnym kierunku.

W przypadku gdy kropla paliwa znajduje się w nieruchomym ośrodku lub porusza się z taką samą szybkością co ośrodek, przyjmuje się, że procesem, który kontroluje spalanie jest proces odparowania, jako proces przebiegający znacznie wolniej od procesu spalania gazów.

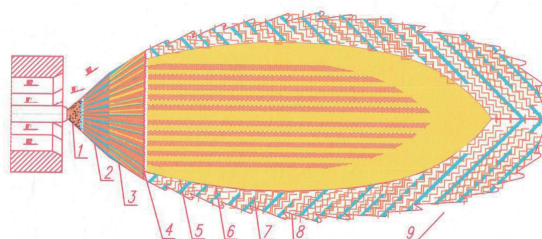
Spalanie paliw ciekłych z jednej strony jest więc homogenicznym procesem chemicznym, z drugiej zaś strony heterogenicznym procesem fizycznym, wymiany ciepła i odparowania z po-

wierzchni kropli. W tym przypadku kropla paliwa jest sferycznie otoczona frontem płomienia o promieniu około 10 razy większym od promienia kropli.

Jeżeli natomiast kropla paliwa posiada względną prędkość w stosunku do poruszającego się ośrodka, proces spalania ma inny charakter. Napływający strumień powietrza nieprzerwanie zdmuchuje od strony czoła kropli, powstające pary, miesza je z tlenem i tworzy w tylnej części kropli gazową mieszankę palną, która ulega zapłonowi i spalaniu tworząc ognio- wy „warkocz”. W tym przypadku kropla odparowuje na całej powierzchni, a powstałe produkty mieszają się z tlenem i spalają się w przestrzeni poza kroplą.

Struktura płomienia przedstawiona została schematycznie na rys. 2. Na schemacie przedstawione zostały fazy przemiany paliwa ciekłego w palną mieszankę gazową. Poszczególne fazy procesu nie posiadają ostrych granic rozdziału w przestrzeni i w czasie lecz zachodzą na siebie i przebiegają równolegle. Mogą przebiegać jednocześnie w tej samej przestrzeni płomienia. Przedstawiona struktura jest charakterystyczna dla palnika gazodynamicznego z wewnętrznym mieszaniami, gdy czynnikiem rozpylającym jest sprężone powietrze lub para wodna.

Powietrze rozpylające poprzez szereg dysz i komór mieszania znajdujących się wewnątrz głowicy palnika rozbija jednolitą strugę paliwa na szereg odrębnych fragmentów, wytwarzając mieszaninę paliwowo-powietrzną o prawie jednorodnej strukturze. Fragmenty cieczy po wyjściu z dyszy palnika rozbite zostają na drobne krople, równomiernie rozłożone w strumieniu wypełniającego powietrza, co obrazuje 1-sza strefa na rys.2.



Rys.2.Struktura żagwi płomienia palnika gazodynamicznego z wewnętrznym mieszaniami, z rozpylanym powietrzem lub parą: 1-Strefa kropel paliwa i powietrza lub pary wodnej i par węglowodorowych, 2-Strefa par węglowodorowych, gazu palnego i powietrza, 3-Czoło frontu płomienia, 4-Strefa par węglowodorowych i gazu palnego, 5-Strefa bogatej mieszanki gazowo-tlenowej, 6-Front płomienia, 7-Strefa przyplamienna, 8-Kontur żagwi płomienia, 9-Strefa popłamienna.





W przypadku gdy czynnikiem rozpylającym jest para wodna, wewnątrz głowicy palnika powstaje mieszanina paliwowo-parowo-wodna. Wyływające z dyszy krople paliwa otoczone są filmem wodnym, który posiadając różne od paliwa, ciepło parowania i napięcie powierzchniowe, powoduje mikroeksplozje kropeł i dalszy ich rozpad. W zależności od stanu termodynamicznego pary rozpylającej, a szczególnie od jej temperatury, następuje wewnątrz głowicy palnika częściowy rozkład termiczny paliwa. Wydzielają się mniej stabilne termiczne frakcje zawierające pary lekkich węglowodorów. W przypadku pary wodnej w strefie 1-szej znajdują się więc bardzo drobne krople paliwa o wymiarach znacznie mniejszych niż w przypadku rozpylającego powietrza [18, 19, 23], gazowe frakcje lekkich węglowodorów i para wodna. W wyływającym strumieniu paliwowo-parowym brak jest tlenu do wstępnego utleniania generowanych węglowodorów. Potrzebny tlen doprowadzony jest z zewnątrz, ze strumieniem powietrza pierwotnego (W1). Ilość powietrza pierwotnego jest niewielka, w granicach 20÷30% powietrza stechiometrycznego. Jest to ilość niezbędna do wstępnego utleniania węglowodorów oraz do utworzenia mieszanki palnej, zdolnej do zapłonu i spalania w czole frontu płomienia (strefa 3). Szybkość wyływu powietrza pierwotnego z uwagi na stabilność czoła frontu płomienia musi być mniejsza od normalnej prędkości spalania w czole frontu. Powietrze pierwotne zasysane jest do wnętrza drugiej strefy przez strumień wyływających par węglowodorów i pary wodnej.

W drugiej strefie następuje dalsze odparowanie kropeł paliwa w wyniku promieniowania frontu czoła płomienia (3). Powstają pary węglowodorowe, które ulegają dalszemu rozkładowi na węglowodory lekkie. Przy obecności tlenu węglowodory częściowo zostają utlenione. Powstaje gaz palny zawierający CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> itd. (strefa 4).

Gaz ten z doprowadzonym tlenem tworzy bogatą mieszkankę palną (strefa 5). Mieszanka ta ulega zapłonowi i tworzy front płomienia (strefa 6). Czoło frontu powstaje w strefie górnej granicy zapłonu bogatej mieszanki gazowej. Przez czoło frontu do dalszej części płomienia przenikają pary oraz nadmiar gazu węglowodorowego.

We froncie czoła płomienia gdzie temperatura jest zbliżona do teoretycznej temperatury spalania, następuje termiczna dysocjacja pary wodnej. Powstający w wyniku dysocjacji wodór i tlen bierze bezpośredni udział w spalaniu lub przenika do następnej strefy płomienia.

Struktura i położenie czoła frontu płomienia w dużej mierze zależy od rodzaju czynnika rozpylającego. W przypadku powietrza, czoło frontu płomienia jest intensywnie biało-żółte, w przypadku pary wodnej niebiesko-żółte. Barwa frontu jest zależna od ilości tlenu i jego równomiernego rozłożenia w strefie tworzenia się gazu węglowodorowego. Obecność równomiernie rozłożonego w skali molekularnej tlenu zapobiegania krakingowi węglowodorów, powstaniu cząstek sadzy oraz ciężkich węglowodorów, które spalając się dają ciemno-żółte widmo, co jest charakterystyczne dla rozpylania parowego, gdy jest niedostateczna ilość tlenu i gdy jest on nierównomiernie rozłożony. Czoło frontu płomienia umiejscawia się w przestrzeni, w której występuje równowaga normalnej prędkości spalania, oraz szybkości przepływu wytworzonej mieszaniny palnej. O ile normalna prędkość spalania jest wielkością charakterystyczną dla powstałej gazowej mieszanki palnej o tyle szybkość przepływu mieszanki jest uzależniona od wydajności palnika oraz od ilości i szybkości wyływu powietrza pierwotnego (W1). Czoło frontu płomienia powinno stabilizować się w bezpośrednim sąsiedztwie palnika.

Przy stabilnym spalaniu pary i gaz węglowodorowy nie skonsumowane w czole frontu płomienia przedostają się do środkowej (5) strefy płomienia. W strefie tej następuje całkowite przejście par węglowodorowych w gaz, oraz rozpoczyna się rozkład termiczny węglowodorów. Ponieważ w strefie tej panuje atmosfera beztlenowa, proces rozkładu węglowodorów przebiega bez kontaktów z tlenem. Tlen, który pochodzi z dysocjacji pary wodnej zostaje zużyty w bezpośrednim sąsiedztwie czoła frontu płomienia. Wokół środkowej (5) strefy płomienia rozciąga się strefa (6) gdzie występuje tylko sam gaz węglowodorowy.

Grubość obu stref (5 i 6) powinna być taka, aby czas przebywania w nich cząstek par i gazów węglowodorowych był mniejszy od czasu



pełnego ich rozkładu termicznego. Powinny być zachowane warunki zabezpieczające przed głębokim rozpadem termicznym, który prowadzi do powstania stałych cząstek sadzy i ciężkich węglowodorów aromatycznych (WWA).

Cząstki gazu powinny przed rozpoczęciem procesu krakingu przejść do środowiska utleniającego w strefie (7), gdzie powstaje gazowa mieszanka palna. Cząstki tlenu dyfundujące z otoczenia płomienia biorą udział we wstępnym utlenianiu węglowodorów zabezpieczając je przed krakingiem. Powstaje mieszanka gazowo-tlenowa, której granice palności stopniowo zmieniają się w przestrzeni przechodząc od bogatej mieszanki niepalnej do mieszanki zdolnej do zapłonu i spalania. Powstaje front płomienia stabilizujący się na powierzchni zbliżonej do powierzchni stechiometrycznej.

Powierzchnia frontu płomienia tworzy się w przestrzeni gdzie strumień gazu palnego i strumień dyfundującego tlenu tworzą mieszaninę o składzie zbliżonym do składu stechiometrycznego. Geometryczne usytuowanie tej powierzchni w przestrzeni uwarunkowane jest więc szybkością dyfuzji tlenu oraz normalną prędkością spalania wytworzonej mieszanki palnej.

Strukturę geometryczną żagwi płomienia wymuszają procesy fizyczne i chemiczne zachodzące głównie w jej wnętrzu. Powierzchnia frontu płomienia jest zależna od ilości spalnego paliwa, a więc od wydajności palnika. Powierzchnię frontu określa długość i średnica żagwi płomienia.

Z uwagi na zachodzące wewnątrz żagwi procesy termicznego rozkładu czas przebywania węglowodorów w beztlenowej atmosferze wewnątrz żagwi powinien być krótszy od czasu pełnego ich rozkładu. Cząstki gazu muszą zdążyć opuścić wewnętrzną strefę płomienia przed pojawieniem się cząstek sadzy i WWA. Droga wyjścia cząstek węglowodorów musi być więc jak najkrótsza, a więc średnica żagwi musi być jak najmniejsza. Żagiew płomienia powinna być więc cienka lecz wydłużona. Istnieje wówczas duże prawdopodobieństwo, że nie będzie wydzielać się sadza i WWA, a płomień będzie miał jasno-żółty kolor charakterystyczny dla spalania CO, H<sub>2</sub> i węglowodorów lekkich.

Pojawieniu się sadzy i WWA nie można

praktycznie zapobiec w przypadku palników o dużych mocach. Nawet w przypadku rozczłonkowanego płomienia i wyrafinowanego doprowadzenia powietrza, część gazu węglowodorowego będzie wędrować wzdłuż płomienia i wpadnie w pułapkę krakingu prowadzącego do powstania sadzy. W końcu żagwi płomienia pojawi się sadza a płomień będzie świecił kolorem czerwonym.

Doświadczalnie stwierdzono, że graniczną wydajnością palnika, powyżej której prawie zawsze będziemy mieć do czynienia z pojawieniem się sadzy jest wydajność 3500-5000 kg/h. Powyższe stwierdzenie dotyczy jednak wyłącznie palników gazodynamicznych z wewnętrznym mieszanym i tylko wówczas gdy nie ma jednolitej bryły płomienia, lecz szereg żagwi rozdzielonych od siebie w przestrzeni. W odniesieniu do palników z rozpylaniem ciśnieniowym, które wytwarzają jednolitą bryłę płomienia o dużej grubości praktycznie niemożliwe jest zapobieżenie powstania sadzy i WWA w palnikach o wydajności większej od 800 kg/h.

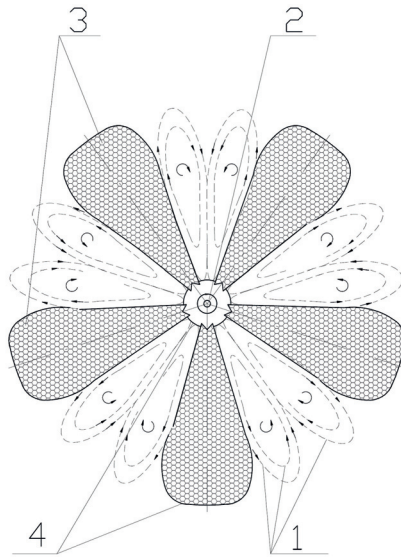
Nawet przy zastosowaniu bardzo doskonałych technik doprowadzenia i mieszania powietrza z paliwem zawsze powstają strefy, w których przebiegają zjawiska krakingu. Praktycznie każdy palnik ciśnieniowy o wydajności powyżej 800 kg/h „dymi”. Na końcu żagwi pojawia się sadza, a płomień ma kolor ciemno-czerwony.

#### **4. Mechanizm powstawania mieszaniny palnej podczas spalania paliw ciekłych.**

Tlen reagujący we froncie zapłonowym żagwi pochodzi z tzw. powietrza „pierwotnego” doprowadzonego kanałem środkowym skrzyni palnikowej oraz z gazu rozpylającego olej. Doprowadzenie powietrza może odbywać się w sposób wymuszony poprzez wentylator podmuchowy lub w sposób naturalny, powietrze jest zasysane przez wewnętrzny wir recyrkulacyjny (rys. 3) płomienia, wspomagany przez podciśnienie panujące w komorze paleniskowej. Bez względu na sposób doprowadzania powietrza „pierwotnego” jego prędkość wylotowa musi być ściśle określone, to znaczy taka aby front żagwi płomienia nie był zbyt odsuwany od dyszy wylotowej palnika.







Rys.3. Struktura geometryczna żagwi płomienia. 1-Recyrkulacja wewnętrzna pomiędzy warkoczami żagwi płomienia, 2-Recyrkulacja wewnętrzna przy froncie zapłonowym żagwi płomienia, 3-Warkocz żagwi płomienia, 4-Powierzchnia frontu płomienia.

Ilość doprowadzonego powietrza powinna być zbliżona do zapotrzebowania wynikającego ze stechiometrii przebiegającego procesu spalania we froncie czoła żagwi. Front czoła żagwi powinien usytuować się jak najbliżej głowicy palnika i nie powinien być odsuwany przez wpływające powietrze „pierwotne”. Przy wymuszonym podawaniu powietrza kanał powietrza „pierwotnego” musi być zaopatrzony w przepustnicę o regulowanym stopniu otwarcia, a przy naturalnym zasysaniu powietrza z otoczenia kotła, kanał zasysający musi być zaopatrzony w żaluzje o regulowanym stopniu otwarcia w zależności od panującego podciśnienia w komorze kotła, które musi być również regulowane.

Gdy o szybkości powstawania mieszaniny palnej decyduje szybkość powstawania gazów węglowodorowych to znaczy gdy szybkość doprowadzania tlenu do strefy przy płomiennej jest wyższa, powstaje sytuacja w której czynnikiem decydującym jest szybkość odparowania kropel paliwa. Gdy szybkość powstawania mieszaniny gazowo-parowej i szybkość mieszania z tlenem przewyższa normalną prędkość spalania, front żagwi płomienia odsuwa się od głowicy palnika i stabilizuje się w nowym położeniu, w którym wytworzona mieszanina posiada maksymalną prędkość spalania. Front płomienia stabilizuje się w położeniu równowagi normalnej prędkości spalania i prędkości napływu mieszaniny pal-

nej. Zerwanie tej równowagi prowadzi do odewania płomienia od palnika.

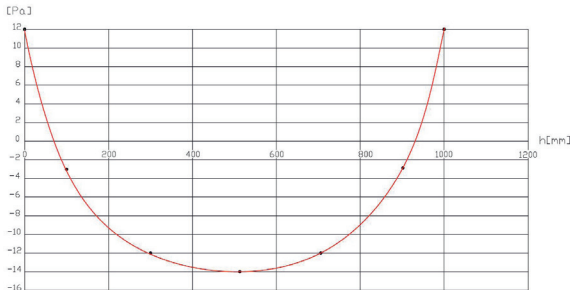
Żagiew płomienia w palniku gazodynamicznym składa się z szeregu oddzielnych, rozczłonkowanych płomieni w formie warkoczy z wolnymi od płomienia przestrzeniami zarówno na obwodzie żagwi jak i w jej części centralnej.

Charakterystyczną cechą płomienia składającego się z szeregu oddzielnych warkoczy jest rozbięcie jednolitej bryły płomienia na kilka oddzielnych żagwi umieszczonych na obwodzie głowicy palnika. Taka struktura płomienia umożliwia dużo łatwiejsze i dokładniejsze wymieszanie z tlenem i utworzenie mieszanki palnej, która umożliwia powstanie struktury płomienia zapewniającego zupełne spalanie bez wydzielania się sadzy, WWA i CO. Front płomienia na poszczególnych żagwiach powstaje w przestrzeni geometrycznej, gdzie tworzy się mieszanina palna bliska stechiometrycznej. W strefie płomiennej żagwi następuje zrównoważenie normalnej prędkości spalania mieszaniny gazowej  $U_n$  z szybkością tworzenia się tej mieszaniny, a więc z szybkością doprowadzania par i gazów węglowodorowych i szybkością dyfuzji tlenu do strefy reakcji. Powstały układ aerodynamiczny umożliwia powstanie obwodowych wirów recyrkulacyjnych pomiędzy poszczególnymi żagwiami oraz powstanie wiru centralnego w osi głowicy również pomiędzy poszczególnymi warkoczami. Powstawała struktura aerodynamiczna żagwi płomienia tworzy gazowy układ przepływowy z wytworzeniem stref podciśnienia na obwodzie płomienia pomiędzy warkoczami żagwi oraz podciśnienia w centralnej części płomienia w jego osi. Powstałe strefy podciśnienia powodują zasysanie powietrza z otoczenia kotła poprzez skrzynię palnikową oraz z wnętrza komory kotła. Powstałe wiry recyrkulacyjne tworzą swego rodzaju układ pomp zasysających powietrze do strefy spalania. Struktura aerodynamiczna żagwi płomienia została określona na podstawie badań modelowych i została potwierdzona doświadczalnie w oparciu o pomiary rozkładu ciśnienia w żagwi płomienia palnika o wydajności nominalnej oleju  $B_n = 400, 600, 800, 1000 \text{ kg/h}$ . Przykładowy schemat żagwi płomienia palnika o wydajności  $1000 \text{ kg/h}$  przedstawiony jest na rys.3. Płomień składa się z 5-ciu oddzielnych ża-



gwi utworzonych równomiernie na poboczniczy głowicy palnika.

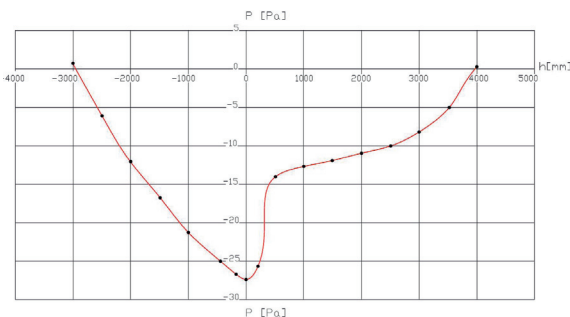
Określony rozkład ciśnień pomiędzy warkoczami dwóch żagwi w odległości  $x=500\text{mm}$  od osi palnika przedstawiony jest na wykresie rys.4.



Rys.4. Rozkład ciśnień pomiędzy warkoczami dwóch żagwi w odległości  $x=500\text{mm}$  od osi palnika.

Z wykresu widać, że wytworzone podciśnienie na obwodzie żagwi płomienia pomiędzy warkoczami umożliwia zasysanie powietrza z otoczenia.

Z wykresu na rys.5 widać, że w skrzyni palnikowej bezpośrednio za głowicą palnika powstaje podciśnienie rzędu 28 Pa, które powoduje zasysanie powietrza z otoczenia kotła do żagwi płomienia.



Rys.5. Rozkład ciśnienia wzdłuż osi palnika.

Przeprowadzone badania wykazały, że aerodynamika żagwi płomienia w palnikach gazodynamicznych z wewnętrznym mieszaniem w pełni zabezpiecza w samoistny sposób powietrze do spalania.

Warunek ten jest spełniony wówczas gdy komora spalania jest nieszczelna i skrzynia palnikowa posiada żaluzję do zasysania powietrza z zewnątrz kotła.

Struktura żagwi płomienia gliceryny technicznej spalanej w palniku gazodynamicznym o wydajności 1000 kg/h przedstawiona została na zdjęciu rys.6. Żagiew płomienia została utworzona w otwartej przestrzeni, na stanowisku badawczym.

Przeprowadzone badania wykazały że temperatura i aerodynamika otoczenia nie wywierają praktycznie żadnego wpływu na proces zapłonu, stabilności i sprawności spalania gliceryny technicznej w palniku gazodynamicznym typu „K”. Na poniższym zdjęciu dobrze widoczna jest rozczłonkowana struktura żagwi płomienia, dodatkowo rozczłonkowana przez poddmuchy powietrza.



Rys.6. Struktura żagwi płomienia gliceryny technicznej o wydajności 1000 kg/h.

## 5. Wyniki badań.

### 5.1. Własności fizykochemiczne badanych biopaliw ciekłych.

Badania procesu spalania oleju rzepakowego tłuszczu zwierzęcego i gliceryny jako pozostałości po reformingu oleju rzepakowego w celu uzyskania oleju napędowego do silników wysokoprężnych przeprowadzono w skali technicznej przy pomocy gazodynamicznych palników dwuczynnikowych z wewnętrznym mieszaniem o nominalnej wydajności 800, 1000, 1500 kg/h. Badania przeprowadzono w komorze kotła OP-230 i OP-380.

W celu opracowania parametrów konstrukcyjnych, hydraulicznych i aerodynamicznych: palników wykonano kompleksowe oznaczenia analizy technicznej i elementarnej badanych biopaliw oraz wyznaczono ich parametry fizyczne mające bezpośredni wpływ na ich proces transportu, magazynowania z rozpylania.

Wykonano oznaczenia analizy:

- technicznej
- elementarnej
- własności fizycznych





Oznaczenia dokonano zgodnie z odpowiednią normą paliwową.

Analiza techniczna

- zawartość wilgoci (Wr) oznaczono metodą destylacyjną wg PN-80/G-04511, [%]
- zawartość popiołu (Ar) wg PN-80/G04512 [%]
- zawartość części lotnych (Vr) wg PN-81/G-04516 [%]
- wartość opałowa (Qri) wg PN-81/G-04513 [kJ/kg]

Analiza elementarna

Analizy wykonano przy pomocy aparatur Vario El firmy Elementar Analysystem Gm D. H. Analiza polega na katalitycznym spalaniu próbek w temperaturze 1100°C w atmosferze tlenu [%].

Analiza fizycznych własności użytkowych

- Gęstość w 20°C wg PN-90/C-04004, [g/cm<sup>3</sup>]
- Temperatura zapłonu w tyglu zamkniętym wg PN-75/C-04009, [°C]
- Temperatura zapłonu w tyglu otwartym wg PN-92/C-04191, [°C]
- Lepkość kinematyczna wg PN-81/C-04011 [mm<sup>2</sup>/s]
- Temperatura płynięcia oleju wg PN-83/C-04117, [°C]
- Liczba kwasowa wg Pn-85/C-04066, [mg KOH/g]

Badania zostały przeprowadzone w Instytucie Chemii i Technologii Nafty i Węgla Politechniki Wrocławskiej oraz w Instytucie Przemysłu Mięsnego i Tłuszczowego w Warszawie.

Przedmiotem badań były:

1. - nierafinowane surowe oleje rzepakowe z:
  - Kujawskich Zakładów Przemysłu Tłuszczowego w Kruświcy,
  - Nadodrzańskich Zakładów Przemysłu Tłuszczowego SA w Brzegu,
  - Zamojskich Zakładów Przemysłu Tłuszczowego „Bolmar” w Badaczowie k./Zamościa,
2. - tłuszcze zwierzęce z:
  - Jezuicka Struga S.A.
3. - gliceryna z:
  - Rafineria „Trzebinia”

### 5.1.1. Olej rzepakowy

Własności fizykochemiczne oleju rzepakowego z tłoczni w Brzegu przedstawione są w tabeli nr 1 i 2.

Lp.	Oznaczenie	Symbol	Wymiar	Wartość w stanie roboczym
1.	Wilgość	Wr	%	0,08
2.	Popiół	Ar	%	0,04
3.	Części lotne	Vr	%	98,00
4.	Karbonizat	Kr	%	1,68
5.	Wartość opałowa	Qri	kJ/kg	38850
Skład elementarny				
6.	Węgiel	Cr	%	70,08
7.	Wodór	Hr	%	10,44
8.	Azot	Nr	%	0,01
9.	Siarka	Sr	%	0,01
10.	Tlen	Or	%	11,28
Własności fizyczne określone w temperaturze 20°C				
11.	Gęstość w 20oC	dr	g/cm <sup>3</sup>	0,917
12.	Gęstość w 15oC	dr	g/cm <sup>3</sup>	0,888
13.	Napięcie powierzchniowe	δ	kg/s <sup>2</sup>	0,047
14.	Lepkość dynamiczna	μ	mPas	82
15.	Lepkość kinematyczna	υ	mm <sup>2</sup> /s	66,74
16.	Temperatura krzepnięcia	tk	°C	-14
17.	Temperatura blokady filtra	tb	°C	-2,0
18.	Temperatura zapłonu	tz	°C	298
19.	Temperatura zapłonu w tyglu zamkniętym	tz.z.	°C	>175
20.	Liczba kwasowa	L.k.	mgKOH/g	2,20

Tabela nr 1. Wynik oznaczeń analizy technicznej, elementarnej i niektóre własności fizyczne-użytkowe oleju rzepakowego.

Lp.	Temperatura t1 [°C]	Gęstość d [g/cm <sup>3</sup> ]	Napięcie powierzchniowe δ [kg/s <sup>2</sup> ]	Lepkość dynamiczna μ [mPas]	Lepkość kinematyczna υ [mm <sup>2</sup> /s]
1.	20	0,896	0,049	60	66,74
2.	30	0,882	0,047	57	52,52
3.	40	0,875	0,045	52	35,73
4.	50	0,869	0,043	47	25,06
5.	60	0,866	0,042	44	14,96
6.	70	0,864	0,041	43	12,76
7.	80	0,863	0,040	42	8,46
8.	90	0,862	0,039	41	7,63
9.	100	0,861	0,038	41	6,92

Tabela nr 2. Wpływ temperatury na niektóre własności fizyczne oleju rzepakowego.

Przeprowadzone badania oleju rzepakowego uzyskanego na drodze zimnego tłoczenia nasion rzepaku od trzech największych krajowych wytwórców oleju wykazały znaczne różnice w uzyskanych oznaczeniach. Różnice te wynikają

z różnic genetycznych i agrotechnicznych uprawianych odmian rzepaku oraz stosowanych technologii tłoczenia przez poszczególnych wytwórców. Różnice w oznaczeniach charakterystycznych parametrów oleju, pochodzącego od różnych wytwórców są na tyle istotne, że oznaczenia należy prowadzić indywidualnie dla każdej partii oleju rzepakowego.

Przykładowe oznaczenia poszczególnych parametrów dla badanych olei mogą zmieniać się w przedziale:

- gęstość  $\rho = 0,863 \div 0,924 \text{ g/cm}^3$
- napięcie powierzchniowe  $\delta = 0,044 \div 0,051 \text{ kg/s}^2$
- lepkość kinematyczna  $\nu = 64,35 \div 84,16 \text{ mm}^2/\text{s}$
- lepkość dynamiczna  $\mu = 60 \div 69 \text{ mPas}$
- wartość opałowa  $Q_{ri} = 36250 \div 39200 \text{ kJ/kg}$
- zawartość węgla  $C_r = 75,14 \div 79,63\%$
- zawartość wodoru  $H_r = 10,84 \div 11,95\%$
- zawartość azotu  $N_r = 0,09 \div 0,25\%$
- zawartość siarki  $S_r = 0,00 \div 0,02\%$
- temperatura krzepnięcia  $t_k = -11,5 \div -14,8^\circ\text{C}$
- temperatura zapłonu  $t_z = 293 \div 318^\circ\text{C}$

Porównując własności fizykochemiczne nierafinowanego oleju rzepakowego można stwierdzić że ma on własności fizykochemiczne zbliżone do paliw ropopochodnych i estrów metylowych wyższych kwasów tłuszczowych. Charakteryzuje się wysoką wartością opałową zbliżoną do wartości opałowej olei ropopochodnych, lecz posiada lepkość kinematyczną ponad 20-krotnie wyższą, a napięcie powierzchniowe 2-krotnie wyższe od oleju opałowego.

Olej rzepakowy posiada bardzo wysoką temperaturę zapłonu, przekraczającą niekiedy  $300^\circ\text{C}$ . Obniżenie temperatury zapłonu uzyskano, mieszając olej rzepakowy z ropopochodnym olejem opałowym. Już 10% dodatek oleju opałowego obniża temperaturę zapłonu do poziomu  $160^\circ\text{C}$ . Olej rzepakowy stanowi energetyczną alternatywę dla paliw ropopochodnych, ponieważ jest paliwem zaliczanym do odnawialnych źródeł energii i nie zawiera siarki, a więc nie emituje do atmosfery tlenków siarki.

Analiza techniczna, elementarna oraz własności fizykochemiczne oleju rzepakowego nie świadczą o zagrożeniu ekologicznym oleju rzepakowego w kotłach energetycznych. W porównaniu z ciężkim olejem opałowym (Nr 3) olej rzepakowy zawiera śladowe ilości siarki i azotu,

co powoduje że w spalinach nie będzie paliwowych tlenków siarki i azotu. Zawartość wilgoci (Wr) i popiołu (Ar) jest porównywalna z wielkością osadu i wody w oleju opałowym. Analiza chemiczna oleju rzepakowego nie wykazuje pierwiastków, które podczas spalania mogłyby generować substancje korodujące powierzchnie ogrzewalne kotła.

### 5.1.2. Gliceryna

W związku z brakiem możliwości wykorzystania czystego oleju roślinnego w silnikach spalinowych konieczna jest jego modyfikacja. Proces ten polega na bezciśnieniowym przeestryfikowaniu czystego oleju z metanolem w obecności katalizatora. W efekcie tego procesu otrzymuje się ester metylowy kwasów tłuszczowych (biodiesel) i glicerynę ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ). Gliceryna poddawana jest procesowi oczyszczania z wody i metanolu, w wyniku czego uzyskuje się glicerynę techniczną o stężeniu 90-99%. Gliceryna otrzymana w procesie transestryfikacji, podobnie jak biodiesel który uznawany jest za paliwo wyprodukowane z biomasy, powinna być również uznana za paliwo wyprodukowane z biomasy. Gliceryna mogłaby być wówczas wykorzystana do rozliczenia emisji  $\text{CO}_2$  i rozliczenia energii elektrycznej i wynikających z obowiązku uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, przy rozliczaniu ilości energii elektrycznej i ciepłej wytworzonych w odnawialnych źródłach energii.

Gliceryna jest gęstą oleistą cieczą, bardzo dobrze rozpuszczalną w wodzie. Jest higroskopijna i lotna z parą wodną. Jest związkiem nietoksycznym.

- Temperatura topnienia wynosi  $t_t > 18, 20^\circ\text{C}$
- Temperatura wrzenia  $t_w > 290^\circ\text{C}$
- Temperatura rozkładu termicznego  $t_{roz} = 295^\circ\text{C}$
- Gęstość w temperaturze  $t = 20^\circ\text{C}$   $d = 0,80 \div 1,30 \text{ g/cm}^3$
- Zawartość popiołu  $A_r = 0,80 \div 5,00\%$
- Zawartość wilgoci  $W_r = 0,30 \div 9,00\%$
- Zawartość chlorków  $< 0,05\%$
- Zawartość metali ciężkich  $< 0,05\%$
- Zawartość gliceryny ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ) =  $80 \div 99\%$
- Ciepło spalania  $Q_{rc} = 17000 \div 22000 \text{ kJ/kg}$
- Kwasowość L.k. =  $0,2 \text{ mg NaOH/g}$

W warunkach środowiska naturalnego ule-





ga biodegradowalności w czasie 25 dni. Wyniki analizy technicznej i elementarnej gliceryny technicznej przedstawione są w tabeli nr 3.

Lp.	Nazwa oznaczenia	Symbol	Wymiar	Wartość w stanie		
				roboczym	analitycznym	bezwodnym i bezpopiołowym
1.	Wilgoć	W	%	0,94	0,32	-
2.	Popiół	P	%	0,03	0,03	-
3.	Części lotne	V	%	98,67	98,99	99,32
4.	Karbonizat	K	%	0,36	0,66	0,68
5.	Wartość opałowa	Qi	kJ/kg	20348	20245	20496
6.	Ciepło spalania	Qc	kJ/kg	21986	22070	22147
7.	Węgiel	C	%	78,93	79,20	79,48
8.	Wodór	H	%	10,72	10,76	10,80
9.	Azot	N	%	0,01	0,01	0,01
10.	Siarka	S	%	0,01	0,01	0,01
11.	Chlor	Cl	%	0,05	0,05	0,05
12.	Tlen	O	%	9,31	9,62	9,65
13.	Gęstość w temperaturze 20°C	d	g/cm <sup>3</sup>	0,98	-	-
14.	Lepkość kinematyczna w 20°C	u	mm <sup>2</sup> /s	116,52	-	-
15.	Lepkość dynamiczna w 20°C	μ	mPas	116,00	-	-
16.	Napięcie powierzchniowe w 20°C	δ	kg/s <sup>2</sup>	0,0550	-	-
17.	Temperatura topnienia	tt	°C	>18,5	-	-
18.	Temperatura wrzenia	tw	°C	>300	-	-
19.	Temperatura rozkładu termicznego	tr	°C	>325	-	-
20.	Temperatura zapłonu w tyglu zamkniętym	tz.z.	°C	>148	-	-
21.	Temperatura zapłonu w tyglu otwartym	tz.o.	°C	>290	-	-
22.	Temperatura blokady filtra zimnego	tb	°C	>-1	-	-
23.	Liczba kwasowa	L.K.	mg KOH/g	0,5	-	-

Tabela nr 3. Analiza techniczna i elementarna oraz wybrane własności fizyczne gliceryny technicznej.

W tabeli nr 4 przedstawione zostały wybrane własności fizyczne gliceryny technicznej.

Lp.	Temperatura	Gęstość	Napięcie powierzchniowe	Lepkość dynamiczna	Lepkość kinematyczna
	t [°C]				
1.	20	0,282	0,0550	116	116,52
2.	40	0,953	0,0500	101	66,50
3.	60	0,942	0,0470	90	26,70
4.	80	0,940	0,0458	85	18,35
5.	90	0,938	0,0452	82	14,50
6.	100	0,937	0,0446	80	13,75

Tabela nr 4. Wpływ temperatury na własności fizyczne gliceryny technicznej.

Gliceryna techniczna nie stanowi zagrożenia dla zdrowia człowieka. Nie zawiera substancji niebezpiecznych. Pary gliceryny tworzą z powietrzem mieszaniny wybuchowe. W przypadku niecałkowitego spalania i termicznego rozkładu powstaje tlenek węgla i niebezpieczna akroleina. Nie klasyfikuje się z uwagi na niebezpieczeństwo pożarowe i wybuchowe, nie są dokładnie ustalone dopuszczalne; dolne i górne granice stężeniowe par gliceryny.

W warunkach normalnych jest stabilna fizycznie i chemicznie. W wodzie ulega szybkiej biodegradowalności. W roztworze wodnym działa korodująco na aluminium. Silne ogrzewanie powoduje gwałtowną przemianę w gaz węglowodorowy, co przy braku spalin prowadzi do powstania niebezpiecznej akroleiny. W temperaturze otoczenia, gliceryna techniczna nie jest substancją lotną. W obecności utleniaczy, szybko ulega procesowi utleniania.

### 5.1.3. Tłuszcz zwierzęcy

Wyniki analizy technicznej i elementarnej tłuszczu zwierzęcego przedstawione są w tabeli nr 5.

Lp.	Nazwa oznaczenia	Symbol	Wymiar	Wartość w stanie		
				roboczym	analitycznym	bezwodnym i bezpopiołowym
1.	Wilgoć	Wr	%	0,87	0,56	-
2.	Popiół	Ar	%	0,83	0,84	-
3.	Części lotne	Vr	%	98,13	98,44	99,84
4.	Karbonizat	Kr	%	0,16	0,16	0,16
5.	Wartość opałowa	Qri	kJ/kg	38197	38316	38858
6.	Ciepło spalania	Qrc	kJ/kg	40831	40958	41537
7.	Węgiel	Cr	%	75,18	75,41	76,48
8.	Wodór	Hr	%	12,00	12,04	12,21
9.	Azot	Nr	%	0,79	0,80	0,81
10.	Siarka	Sr	%	0,05	0,05	0,05
11.	Tlen	Or	%	10,27	10,30	10,45
12.	Chlor	Clr	%	-	-	-
13.	Gęstość w temperaturze 20°C	d	g/cm <sup>3</sup>	0,9157	-	-
14.	Lepkość kinematyczna w temp. 20°C	u	cst	95,56	-	-
15.	Lepkość dynamiczna	μ	mPas	108	-	-
16.	Napięcie powierzchniowe	δ	kg/s <sup>2</sup>	0,053	-	-
17.	Temperatura topnienia	t	°C	31,6	-	-
18.	Temperatura zapłonu	tz	°C	308	-	-
19.	Temperatura zapłonu w tyglu zamkniętym	tz.z	°C	>184	-	-
20.	Kwasowość (jako kwas oleinowy)	K	%	9,80	-	-

Tabela nr 5. Analiza techniczna, elementarna oraz wybrane własności fizyczne tłuszczu zwierzęcego.

W tabeli nr 6 przedstawione zostały wybrane własności fizyczne tłuszczu zwierzęcego.

Lp.	Temperatura	Gęstość	Napięcie powierzchniowe	Lepkość dynamiczna	Lepkość kinematyczna
	t [°C]				
1.	20	0,916	0,053	108	95,56
2.	30	0,907	0,049	98	60,28
3.	40	0,897	0,047	90	45,81
4.	60	0,890	0,045	84	23,32
5.	80	0,887	0,044	78	13,82
6.	90	0,885	0,043	75	11,16
7.	100	0,884	0,042	73	9,17

Tabela nr 6. Wpływ temperatury na własności fizyczne tłuszczu zwierzęcego.

Analiza elementarna oraz własności fizykochemiczne tłuszczu zwierzęcego nie świadczą o zagrożeniu ekologicznym dla otoczenia przy spalaniu go w kotłach energetycznych. Zawartość wilgoci i popiołu jest porównywalna z wielkością osadu i wody oleju opałowym. Tłuszcz zwierzęcy w porównaniu z olejami ropopochodnymi zawiera śladowe ilości siarki i azotu. Wartość opałowa jest porównywalna z wartością opałową ciężkiego oleju ropopochodnego, a zmiana fizycznych parametrów tłuszczu z temperaturą pod kątem jakości rozpylania jest znacznie korzystniejsza.

Lepkość kinematyczna (u) rozpylanych substancji jest podstawowym parametrem fizycznym rozpylanej cieczy, który decyduje o strukturze wymiarowej kropeł powstających w trakcie rozpylania.

Porównując lepkość kinematyczną (u) oleju rzepakowego, tłuszczu zwierzęcego i gliceryny z lepkością ciężkiego oleju nr 3 (mazutu) w temperaturze powyżej 70°C  $u = 73,6$  cst, można stwierdzić że paliwa biomasowe, posiadają lepkość kinematyczną prawie 3-krotnie mniejszą. Mniejsza jest również gęstość właściwa (d) oleju rzepakowego i tłuszczu zwierzęcego. Gęstość mazutu jest porównywalna jedynie z gęstością gliceryny. W zbliżonych warunkach temperaturowych napięcie powierzchniowe (δ) i lepkość dynamiczna (μ) badanych substancji jest kilkakrotnie mniejsza od tych samych właściwości ciężkiego oleju opałowego nr 3 (ma-

#### Literatura

- [1] Karcz H., i in.: Palnik do spalania paliwa ciekłego. Patent nr 164172 z dnia 01.10.1990 r.
- [2] Karcz H. i in.: Palnik do spalania paliwa ciekłego. Patent nr 166575 z dnia 13.02.1992 r.
- [3] Wanatowicz S., Karcz H., Zembrzusi M.: Palnik do spalania paliwa ciekłego. Patent nr 1507225 z dnia 30.01.1987.
- [4] Koval A.A., Shaler A., Słupek S., Kokkinos A., Miskovsky N.M., Essenhigh: Combustion Characteristic of Oil-Water-Air Emulsion Paper prepared for Research of the Symposium Los Angeles, Nov. 1975.
- [5] Słupek S.: O możliwości ograniczenia szkodliwości produktów spalania paliw ciekłych. Hutnik nr 11, 404 (1984).
- [6] Kowalewicz A.: Tworzenie mieszanek i spalania w silnikach o zaplonie iskrowym KKiL, Warszawa (1984).
- [7] Law C.K.: Recent advances in droplet vaporization and combustion. Prog in Energy and Combust, Science Vol. 8, (1982).
- [8] Faeth G.M.: Current status of droplet and liquid comb. Prog in Energy and Combust., Science Vol. 3 (1997).
- [9] Wilk R.: Badania zjawiska spalania kropli ciężkiego paliwa ciekłego. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej, Energetyka nr 81, Gliwice (1982).
- [10] Kulagin L.V., Ochotnikov S.S.: Sziganie tjażelych židkich topliv. Nedra Moskva (1967).
- [11] Williams F.R.A.: Teorija gorenja, Izd. Nauka, Moskva (1971).
- [12] Wilk R., Zieliński Z.: Badania czasu spalania kropli ciężkiego paliwa, Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej, Energetyka nr 79, Gliwice (1982).
- [13] Hucknal D.J.: Chemistry of Hydrocarbon Combustion Chapman and Hall, London, New York 1985.
- [14] Petela R.: Paliwa i ich spalanie, G.V. Laboratorium, Politechnika Śląska Gliwice 1984.
- [15] Orzechowski Z.: Rozpylanie cieczy, WNT Warszawa 1976.
- [16] Umemura A., Ogawa S., Oshima N.: Analysis of the interaction between two burning droplets, Combustion Science and Flame 41 1981.
- [17] Twardus E., Brzustowski T.: Combustion Science and Technology 17 1978.
- [18] Karcz H., Zembrzusi M.: A new concept of low pressure atmosphere, XI-th International Symposium on Combustion Processes. Międzyzdroje; Polska, September 1989r.
- [19] Karcz H.: How to minimize environment pollution due to combustion of heavy oil Sc ICUS, XVII Seventh Intern Conference on the Unity of the Sciences, Los





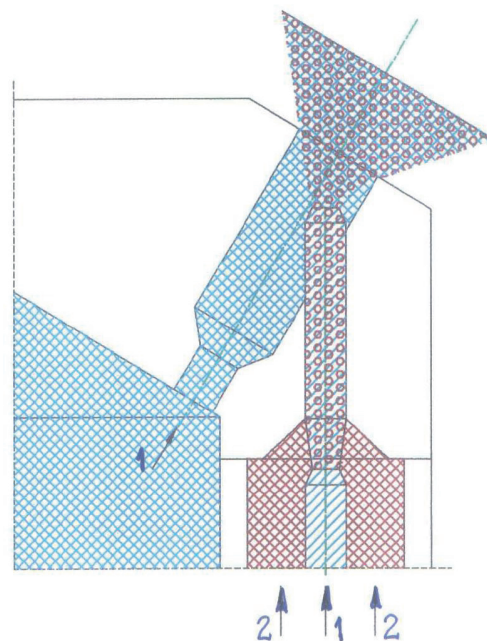
- Angeles 1988.
- [20] Glassman J.: Combustion Academic Press, New York, San Francisco, London 9 1977.
- [21] Nelson H.F.: Nitric oxide formation in combustion. AJAA Vol 14, No 9 1996.
- [22] Zeldovich Y.B.: The oxidation of nitrogen in combustion explosions, Acta Physicochim, USSR 21.577 1947.
- [23] Levis B., Elbe G.: Von, combustion flames and Explosions of Gases New York – London Academy Press 1961.
- [24] Chzmaljan D.M.: Vvedeniye vteorii gorenija. Izdanie. MZJ. 1953.
- [25] Chitrin L.N.: Fizika gorenija i vzryva. Izd. MGU. 1957.
- [26] Karcz H., Wosik W., i in.: Nowa koncepcja palników do spalania ciężkich paliw ciekłych. Charakterystyki techniczne i eksploatacyjne. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 9. 1992.
- [27] Karcz H., Wosik W., i in.: Gazodynamiczny palnik olejowy z wewnętrznym mieszaniem drogą do obniżania emisji substancji szkodliwych do atmosfery. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Energetyka z 12.01.1994. Konferencja Kotłowa Szczyrk 7-10 listopad 1994.
- [28] Karcz H., Jodkowski W., Ładogórski P., Wosik W.: Niskoemisyjne olejowe palniki rozpałkowe, Zeszyty Naukowe WSJ w Opolu nr 2188. Elektryka nr 43 1996. Konferencja Niskoemisyjna Techniki Spalania Ustroń-Zawodzie 28-30 marca 1996.
- [29] Karcz H.: Sposób i układ zapłonu ciężkich paliw płynnych w komorze spalania kotła energetycznego. Zgłoszenie patentowe nr P-318038 z dnia 18.01.1997.
- [30] Karcz H., Sikorski W., Adynowski J., Sokołowski P.: Zapłon ciężkich paliw płynnych w komorach kotłów energetycznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej nr 255/2000 z 49 s. 219-229 GRE2000 VII Forum Energetyków "pod Szyndzielnią" Opole 2000.
- [31] Karcz H., Adynowski J., Sokołowski P.: Systemy zapłonu palników olejowych. Prace Naukowe Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej nr 56. Seria Konferencje nr 10. s. 399-406 Energetyka 2000. Wrocław 8-10 listopad 2000.

zutu). Właściwości fizyczne paliw biomasowych, które decydują o jakości rozpylenia i strukturze wymiarowej kropeł rozpylanej cieczy w warunkach termicznych, które są powszechnie stosowane przy spalaniu oleju opałowego nr 3 ( $t = 80 \div 140^\circ\text{C}$ ) są w odniesieniu do oleju rzepakowego, tłuszczu zwierzęcego i gliceryny technicznej znacznie korzystniejsze niż dla ciężkich olei ropopochodnych. Przy tych samych parametrach termodynamicznych, podawanego do palnika oleju uzyskuje się znacznie wyższą sprawność termiczną spalania, przy niższej emisji substancji szkodliwych do otoczenia ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ , Corg, WWA).

## 5.2. Badanie procesu zapłonu i spalania biopaliw przy pomocy gazodynamicznego palnika z wewnętrznym mieszaniem typu „K”

Szybkość powstania gazu węglowodorowego na wylocie z dyszy palnika jest uwarunkowana zmianami strukturalnymi zachodzącymi w paliwie w głowicy palnika i stopniem rozpylenia paliwa na wylocie z dyszy palnika. Im wielkość kropeł jest mniejsza, tym szybkość powstania gazu węglowodorowego jest większa. Wielkość kropeł musi być taka aby zdążyły odparować w przestrzeni pomiędzy dyszą palnika, a frontem płomienia, który w momencie zapłonu, powstaje w pobliżu źródła zapłonowego. W przestrzeni umiejscowienia źródła zapłonowego musi powstać mieszanka palna. Średnica kropeł jaka jest wymagana aby taka mieszanka powstała, jest zależna od właściwości fizycznych rozpylanej cieczy (lepkość, gęstość, napięcie powierzchniowe) i dla badanych paliw powinna być zawarta w przedziale od 2 do 10  $\mu\text{m}$ . Taka struktura wymiarowa kropeł gwarantuje całkowite ich odparowanie i utworzenie mieszanki palnej, bez separacji kropeł z żagwi płomienia, w przestrzeni bezpośrednio przylegającej do dyszy palnika.

Osiągnięcie zadawalającego rozpylenia badanych biopaliw przy pomocy palników ciśnieniowych lub dwuczynnikowych typu „Y” jest bardzo trudne. Rozwiązaniem problemu jest zastosowanie wielostopniowej technologii rozpylenia jaka jest realizowana w dwuczynnikowych gazodynamicznych palnikach z wewnętrznym mieszaniem [1 ÷ 3, 26 ÷ 28], co przedstawia schemat na rys. 7.



Rys.7. Struktura przepływających mediów przez głowicę palnika gazodynamicznego z wewnętrznym mieszaniem typu „K”. 1-para wodna, 2-gliceryna techniczna (olej rzepakowy, tłuszcz zwierzęcy)

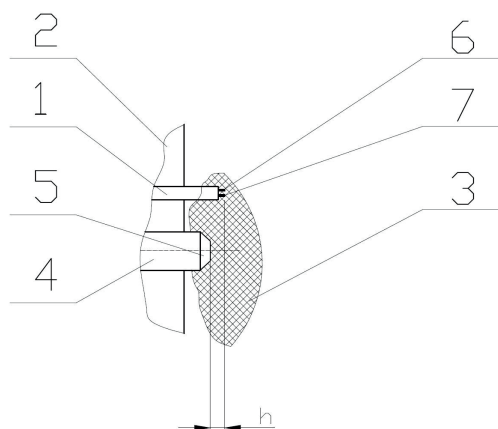
### 5.2.1. Zapłon paliwa biomasowego

Zapłon powstałej mieszanki gazowej jest możliwy przy pomocy źródła zapłonowego o stosunkowo niskiej energii. Iskrowy sposób zapłonu przy pomocy wysokoenergetycznej zapalarki, zasilanej prądem o napięciu 220 V, wytwarzającej iskry o mocy 10-12 J zapewnienia skutecznego zapłonu badanych biopaliw [29-31].

Zapłon ciężkich biopaliw od iskry elektrycznej (220V) możliwy jest jednak tylko wówczas, gdy zapewnione jest odpowiednie rozpylenie paliwa ciekłego. Z dyszy palnika musi wydobywać się mieszanina gazu węglowodorowego i bardzo małych kropeł paliwa. Do strefy działania iskry elektrycznej doprowadzane są wówczas pary i gazy węglowodorowe, które ulegają zapłonowi, podobnie jak gaz w palniku gazowym.

Energia iskry elektrycznej, jej częstotliwość i czas jej trwania oraz usytuowanie w przestrzeni dla skutecznego zapłonu jest uzależnione od składu powstałej mieszanki palnej, która jest charakterystyczną cechą każdego paliwa ciekłego.

Pewność eksploatacyjna wysokoenergetycznej zapalarki elektrycznej jest ściśle związana ze składem i koncentracjami granicami zapłonu oraz właściwościami kinetycznymi [29-31] po-



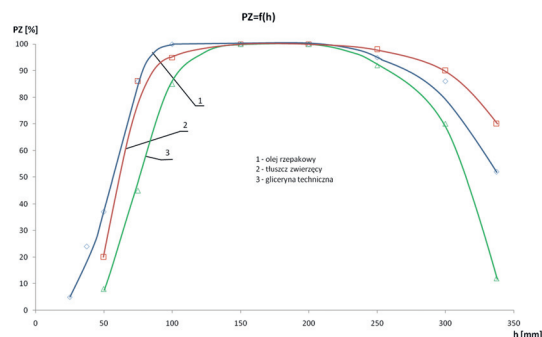
Rys.8. Schemat usytuowania elektrod zapalarki: 1-zapalarka, 2-ściana komory, 3-przestrzeń mieszanki paliwowej, 4-lanca zapalarki, 5-głowica palnika, 6-7-elektrody zapalarki.

wstałej mieszanki palnej w przestrzeni działania iskry elektrycznej (rys. 8).

Przestrzeń (3) w bezpośrednim sąsiedztwie głowicy palnika (5) zajmuje mieszanka palna powstała z rozpylonego paliwa ciekłego i powietrza podawanego ze skrzyni palnikowej. Powstała między elektrodami (6 i 7) zapalarki (1) iskra elektryczna powoduje zapłon paliwa i utworzenie czoła frontu płomienia. Skład mieszanki gazowej oraz jej granicę palności zmieniają się wzdłuż osi wypływu strugi paliwa. Powstała mieszanka palna w odległości (h) od płaszczyzny wylotowej głowicy palnika posiada optymalne warunki zapłonu. Warunki te określone są przez fizykochemiczne i kinetyczne własności węglowodorowej mieszanki parowo-gazowej z powietrzem [24-25].

Pewność i skuteczność zapłonu mieszanki gazowej powstałej w wyniku odparowania kropelek paliwa ciekłego zależy od położenia elektrod zapalarki w przestrzeni zawartej pomiędzy płaszczyzną głowicy, a powierzchnią czoła frontu płomienia. O ile czoło frontu płomienia stabilizuje się na powierzchni zbliżonej do powierzchni stechiometrycznej, gdzie występują warunki równowagowe pomiędzy normalną prędkością spalania a prędkością dopływu mieszanki, to zapłon mieszanki następuje w obszarze pomiędzy jej dolną a górną granicą zapłonową. Pewność zapłonu jest najwyższa w przedziale stężeń, gdzie normalna szybkość spalania danej mieszanki gazowej jest maksymalna. Pewność zapłonu (PZ) określona została jako procentowy udział skutecznych zapłonów paliwa przy pomocy iskry elektrycznej.

Na wykresie rys.9 przedstawiono zależność skuteczności zapłonowej (PZ) wysokoenergetycznej zapalarki elektrycznej w zależności od położenia elektrod (h) w stosunku do dyszy palnika. Optymalne położenie elektrod zapalarki jest uzależnione od rodzaju spalanego paliwa.



Rys.9. Pewność zapłonu (PZ) w zależności od odległości elektrod od dyszy palnika: 1-olej rzepakowy, 2-tłuszcz zwierzęcy, 3-gliceryna techniczna.

Z wykresu wynika, że dla iskry elektrycznej o mocy 12J największa skuteczność (PZ) występuje w warunkach, gdy elektrody zapalarki umieszczone są w przestrzeni oddalonej od dyszy palnika o 100-250mm. Przedział ten jest optymalny dla zapłonu biopaliw podawanych przy pomocy gazodynamicznego palnika z wewnętrznym mieszanym. Umieszczenie elektrod zapalarki w odległości 100mm od krawędzi palnika zapewnia 100% skuteczności zapłonu oleju rzepakowego i nieco mniejszą skuteczność zapłonu tłuszczu zwierzęcego. Gliceryna techniczna zapłonowi ulega w nieco większej odległości od dyszy palnika. Skuteczność zapłonu gliceryny przy pomocy źródła umieszczonego w odległości mniejszej od 100mm od dyszy palnika jest o około 20÷40% mniejsza w porównaniu do oleju rzepakowego i tłuszczu zwierzęcego. Stuprocentowa skuteczność zapłonu gliceryny technicznej występuje, gdy elektrody zapalarki są umieszczone w odległości większej od 150mm od dyszy palnika.

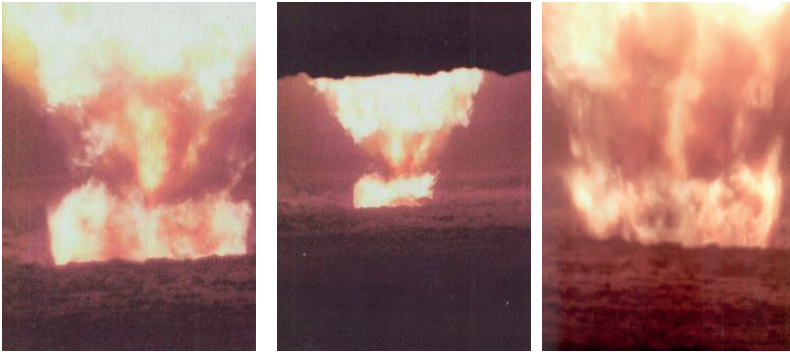
Powyżej odległości  $h=250$ mm, skuteczność zapłonu spada o około 10÷30%. najwyższy 30% spadek skuteczności zapłonu jest charakterystyczny dla gliceryny technicznej. Umieszczenie elektrod zapalarki powyżej  $h=300$ mm, praktycznie eliminuje zapłon gliceryny technicznej. Skuteczność zapłonu oleju rzepakowego i tłuszczu zwierzęcego spada natomiast prawie do 50%.





Prawidłowość ta dotyczy procesu zapłonu oleju rzepakowego, tłuszczu zwierzęcego i gliceryny technicznej w badanym zakresie wydajności palników.

Pewność zapłonu i stabilizacja frontu płomienia spalającego oleju wzrasta w sposób zdecydowany gdy wokół krawędzi wylotowej dyfuzora palnika powstanie pierścien zapłonowy pokazany na zdjęciach rys.10.



Rys.10. Pierścien zapłonowy płomienia palnika o wydajności 1000 kg/h 1-olej rzepakowy, 2-tłuszcz zwierzęcy 3-gliceryna techniczna

Pierścien zapłonowy powstaje w ściśle określonych warunkach aerodynamicznych wypływu powietrza „pierwotnego” i „wtórny” oraz dla ściśle określonej konstrukcji palnika.

Utworzony na krawędzi dyfuzora pierścien zapłonowy jest elementem płomienia, który stabilizuje front płomienia u wylotu z dyszy palnika, przeciwstawiając się zerwaniu płomienia i zgaśnięciu palnika. Pierścien zapłonowy powstaje w wyniku współdziałania parametrów konstrukcyjnych i aerodynamicznych palnika.

Pierścien zapłonowy w zdecydowany sposób zwiększa stabilność frontu płomienia szczególnie dla palników o wielkich mocach oraz zwiększa stabilność pracy palnika przy wysokich ciśnieniach w komorze kotła, przekraczających 50 Pa.

W przypadku powstania stabilizującego pierścienia zapłonowego wyraźnie występują dwa fronty płomienia. Fronty te powstają w wyniku turbulentnego spalania częściowo wymieszanego z utleniaczem paliwa. W pobliżu dyszy palnika znajduje się strefa zimnej mieszanki paliwowej, przechodzącej stopniowo w strefę pierwotnego spalania we froncie pierścienia zapłonowego. W strefie tej w pełni zużywany jest tlen pochodzący z czynnika rozpylającego i powietrza „pierwotnego”. Ze strefy płomienia pier-

wotnego (pierścienia zapłonowego) wychodzi mieszanina gorących produktów spalania oraz gazu palnego, którego koncentracja jest zależna od składu chemicznego spalane go paliwa.

Szerokość pierścienia zapłonowego zależy od ilości wstępnie doprowadzonego utleniacza (czynnik rozpylający), oraz częściowo od ilości powietrza „pierwotnego” wprowadzonego w strefę odparowania kropel. Minimalną szerokość pierścienia zapłonowego będzie posiadał przy mieszance stechiometrycznej.

O ile powietrze rozpylające jest bezpośrednim składnikiem tworzącym mieszaninę palną w strefie pierścienia zapłonowego, to powietrze „pierwotne” z pewnym przybliżeniem można również tak traktować i przyjąć, że mamy do czynienia z mieszaniną palną dającą płomień kinetyczny.

Przeprowadzone badania procesu zapłonu oleju rzepakowego, tłuszczu zwierzęcego i gliceryny technicznej wykazały że struktura fizykochemiczna pierścienia zapłonowego i czoła frontu płomienia jest wyraźnie zależną od rodzaju spalane go paliwa. Przedstawione na rys. 12 zdjęcia frontu płomienia, w sposób wyraźny pokazują że przy identycznych parametrach termodynamicznych podawanych do palnika paliw oraz czynników rozpylających, struktura pierścienia zapłonowego, oraz czoła frontu płomienia jest w każdym przypadku inna. Przedstawione na rys. 10 zdjęcia frontów płomieni pokazują że struktura fizykochemiczna frontu płomienia jest ściśle powiązana z własnościami fizykochemicznymi spalane go paliwa ciekłego.

O strukturze frontu płomienia decyduje ciepło spalania, gęstość właściwa, lepkość i napięcie powierzchniowe spalane go cieczy. Najniższa gęstość, lepkość oraz napięcie powierzchniowe posiada olej rzepakowy, a najwyższe wartości charakterystyczne są dla gliceryny technicznej. Powyższe właściwości limitują proces rozpylania i przejścia fazy ciekłej w fazę gazową. Im wartości te są niższe, tym szybciej faza ciekła, przechodzi w gaz węglowodorowy z którego powstaje mieszanka palna we froncie płomienia.

Analiza zdjęciowa struktury strefy zapłonowej badane go płomieni w pełni potwierdza tę hipotezę. Czoło frontu płomienia paliwa, które posiada najmniej korzystne parametry fizyczne decydujące o szybkości parowania i szybkości



tworzenia gazowej mieszanki palnej, stabilizuje się w największej odległości od dyszy palnika. Własności fizykochemiczne spalanych paliw wywierają swój wpływ na strukturę całej żagwi płomienia. Przedstawione na rys.11 zdjęcia żagwi płomienia pokazują że w tych samych warunkach otoczenia i przy tych samych parametrach podawanych do palnika mediów struktura płomienia, jego wymiary geometryczne oraz intensywność spalania (o czym świadczy barwa płomienia) są ściśle uzależnione od rodzaju spalane paliwa. Olej rzepakowy (zdjęcie nr 1) charakteryzuje się krótkim zwartym płomieniem o intensywnie biało-żółtym kolorze, bez śladów sadzy. Tłuszcz zwierzęcy (zdjęcie nr 2) posiada dłuższy płomień o mniej intensywnym promieniowaniu z pojawiającymi się w końcowych fragmentach żagwi śladami sadzy. gliceryna techniczna charakteryzuje się długim, rozmytym płomieniem o barwie ciemno-żółtej z licznymi śladami sadzy w żagwi płomienia. Przedstawiona na rys.10 i 11 dokumentacja zdjęciowa w sposób dobitny pokazuje że cała struktura fizykochemiczna płomienia jest ściśle powiązane z własnościami fizykochemicznymi spalane paliwa.



1-olej rzepakowy



2-tłuszcz zwierzęcy,



3-gliceryna techniczna.

Rys.11. Żagwie płomienia palnika o wydajności 1000 kg/h: 1-olej rzepakowy, 2-tłuszcz zwierzęcy, 3-gliceryna techniczna.

#### 5.4.Ocena gazowych produktów spalania gliceryny technicznej

Ocenę procesu spalania dokonano w oparciu o emisję substancji szkodliwych, w optymalnym zakresie pracy palnika. Badania stężeń CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> i sadzy przeprowadzono przy pomocy analizatora gazowego typu IMR – 300P ze specjalnie skonstruowaną sondą aspiracyjną z komputerem analizującym stopień cierni płomienia (liczba sadzowa Baharaha).

Badania przeprowadzono w strefie popłomiennej. To, jakie produkty spalania znajdują się w strefie popłomiennej jest ściśle związane ze składem chemicznym paliwa oraz z czasem i dokładnością wymieszania gazowych produktów paliwa i utleniacza. Szybkość i dokładne wymieszanie gwarantuje zupełne spalanie, bez obecności w spalinach, CO, WWA i sadzy. Złe wymieszanie paliwa z tlenem w długim czasie, gdy cząsteczki gazu węglowodorowego docierają do końca strefy żagwi płomienia bez częściowego utleniania do aldehydów i alkoholi, jest przyczyną powstania przede wszystkim tlenku węgla, WWA i cząstek sadzy.

Dokładność i czas wymieszania utleniacza z gazem węglowodorowym jest zależna od wielkości przestrzeni geometrycznej w której występuje proces rozpylania i odparowania kropli paliwa, a więc od wydajności palnika, sposobu doprowadzania powietrza i aerodynamiki płomienia. Badania procesu spalania gliceryny technicznej przeprowadzone zostały przy pomocy dwuczynnikowych palników gazodynamicznych z wewnętrznym mieszanym typu „K”, które z bardzo dobrym skutkiem były, przez autorów, stosowane, od początku lat 80-tych ubiegłego stulecia, do spalania ropopochodnych ciężkich paliw ciekłych takich jak: mazuty, gudrony, smoły oraz biopaliw takich jak: wszelkiego rodzaju oleje roślinne i tłuszcze zwierzęce. Proces spalania gliceryny technicznej przeprowadzono więc, przy pomocy palników, które w pełni zdały egzamin eksploatacyjny w skali technicznej w odniesieniu do paliw, których proces spalania uważany jest za trudny. Całkowite i zupełne spalanie ciężkich paliw ciekłych w warunkach „zimnej” komory kotła, w wyniku którego uzyskuje się „biały” dym z komina, było najlepszą rekomendacją, zastosowania do spalania gliceryny technicznej; dwuczynnikowych





palników gazodynamicznych z wewnętrznym mieszanym typu „K” których konstrukcja jest chroniona licznymi patentami [1-3].

Ponieważ konstrukcja palnika i aerodynamiczna płomienia jest stała, uzyskane wyniki eksploatacyjne i emisyjne spalanej gliceryny są uzależnione jedynie od mocy palnika, a więc od ilości spalanej gliceryny.

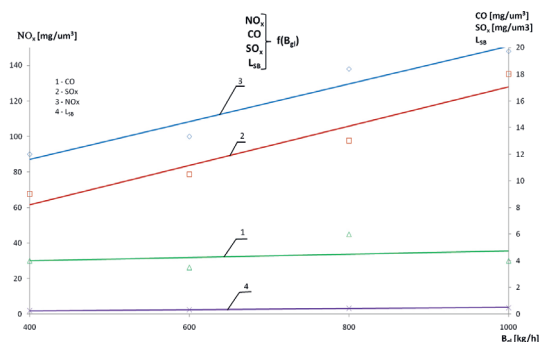
Badania przeprowadzono dla palników o wydajności znamionowej Bgl.= 400, 600, 800, 1000 kg/h. Wyniki określające wpływ wydajności palnika na emisję substancji szkodliwych przedstawia wykres na rys.12. Stężenie CO w spalinach jest prawie niezależne od wydajności palnika i osiąga wartości śladowe, na poziomie 10 mg/um<sup>3</sup> w odniesieniu do 11% O<sub>2</sub>.

Stężenie sadzy scharakteryzowano przy pomocy tzw. Liczby Sadržowej Baharaha (LSB). Przedstawione na wykresie wartości LSB odnoszą się do strefy popłomiennej na wylocie z komory kotła, gdzie temperatura ośrodka gazowego jest stosunkowo niska i gdzie proces dopalania sadzy został zakończony. Z przedstawionej zależności widać że LSB bardzo niewiele zależy od wydajności palnika. Zmienia się od wartości 0,25 do 0,48 przy zmianie wydajności od 400 do 1000 kg/h gliceryny.

Można założyć z dużym prawdopodobieństwem że powstawaniu sadzy będą towarzyszyć wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) a ich stężenie zmieniać się będzie z wydajnością palnika podobnie jak liczba sadzowa (LSB).

Zawartość tlenków siarki (SOx) w spalinach jest znikoma, praktycznie stała, niezależna od wydajności palnika. Zawartość SO<sub>2</sub> w spalinach mieści się w przedziale od 3 do 5 mg/um<sup>3</sup>. Śladowe zawartości SO<sub>2</sub> wynikają z bardzo niewielkiej ilości siarki (poniżej 0,1%) zawartej w glicerynie.

Rys.12. Emisja substancji szkodliwych do atmosfery w zależności od ilości spalanej gliceryny technicznej: 1-CO, 2-SOx, 3-NOx, 4-sadz (LSB).



Tlenki azotu (NOx) przy spalaniu gliceryny, pochodzą głównie z utleniania azotu atmosferycznego. Są to głównie tlenki azotu atmosferycznego, jako tlenki termiczne. Szybkość powstawania tych tlenków zależy przede wszystkim od temperatury płomienia i liczby nadmiaru powietrza. Ponieważ teoretyczna temperatura spalania zawodnionej gliceryny technicznej (w odniesieniu do innych paliw biomasowych i ropopochodnych) jest stosunkowo niska (tt≈ 1538°C), a liczba nadmiaru powietrza jest bliska jedności, stężenie NOx w spalinach palnika gazodynamicznego jest stosunkowo niskie i z wydajnością palnika zmienia się niewiele. Wynika to z charakteru płomienia gliceryny technicznej w palniku gazodynamicznym w którym nie występują obszary bardzo wysokich temperatur przy znacznym nadmiarze powietrza.

## 6. Wnioski

1. Proces spalania ciekłych biopaliw roślinnych, tłuszczów zwierzęcych i ciekłych biopaliw odpadowych jakim jest gliceryna techniczna, może przebiegać z bardzo wysoką sprawnością techniczną i minimalną emisją substancji szkodliwych do atmosfery pod warunkiem zapewnienia wymaganych parametrów fizycznych spalanych substancji i zastosowania właściwych konstrukcji palników.
2. Wykorzystanie gliceryny technicznej jako biopaliwa do opalania kotła energetycznego może przebiegać bez jakichkolwiek modyfikacji chemicznych, przy podgrzewie do 80°C, który w pełni zaspokaja potrzeby wynikające z technologicznego przygotowania biopaliwa do spalania.
3. Wymieszanie gliceryny z czynnikiem rozpylającym wewnątrz lancy palnika gazodynamicznego poprawia stopień rozpylania i odparowania kropeł, co w konsekwencji znacznie przyspiesza proces przejścia paliwa z fazy ciekłej w fazę gazu węglowodородowego. Przy tym czynnikiem rozpylającym może być powietrze o dowolnej temperaturze oraz para wodna wilgotna lub przegrzana.
4. Doprowadzenie powietrza w strefę przed-

- plomienną frontu płomienia w ilości od 20 do 30% ilości powietrza stechiometrycznego zapobiega procesom polimeryzacji i krakingu gazów węglowodorowych, które powodują powstanie w płomieniu WWA i sadzy co prowadzi do niezupełnego spalania.
5. Doprowadzenie powietrza do strefy przedpłomiennej frontu płomienia i dokładne wymieszanie z gazami węglowodorowymi zapobiega zjawiskom „kopcenia” płomienia.
  6. Proces rozpylania i odparowania gliceryny oraz powstanie gazu węglowodorowego przebiega w bezpośrednim sąsiedztwie głowicy palnika. Zapłon i powstanie frontu płomienia jest możliwe w odległości nie mniejszej jak 30mm od głowicy palnika. Optymalna odległość dla elektrod zapalarki od głowicy palnika wynosi 150÷200mm wzdłuż osi płomienia. Skuteczność zapłonu jest wówczas najwyższa i najpewniejsza eksploatacyjnie.
  7. Powstanie stabilizującego pierścienia zapłonowego zapobiega oderwaniu się czoła frontu płomienia do krawędzi wylotowej palnika. Pierścień stabilizujący zabezpiecza płomień przed „zdmuchnięciem” w wyniku gwałtownych zmian szybkości wypływu powietrza zasilającego i gwałtownych zmian podciśnienia w komorze kotła. Zmiany ciśnienia powietrza zasilającego palnik w zakresie od 0,6 do 3,5kPa nie powodują zachwiania warunków równowagowych panujących we froncie płomienia. Pierwotny pierścień stabilizujący zabezpiecza pewność eksploatacyjną palnika w zakresie zmian podciśnienia w komorze kotła w zakresie od -20Pa do -80Pa.
  8. Zawartości substancji szkodliwych w spalinach opuszczających kocioł są znacznie poniżej dopuszczalnych norm krajowych i unijnych i w pełni spełniają wszelkie wymagania, stawiane termicznej utylizacji paliw zaliczanych do odnawialnych źródeł energii.
  9. Energetyczne wykorzystanie odpadowego biopaliwa jakim jest gliceryna techniczna, oprócz efektu ekologicznego, przynosi konkretny efekt ekonomiczny w postaci wytworzonej energii ze źródeł odnawialnych.
  10. Palniki gazodynamiczne z wewnętrznym mieszanym z uwagi na właściwie zorganizowany sposób przedpłomienego wymieszania gazów węglowodorowych z powietrzem posiadają możliwość całkowitego i zupełnego spalania ciężkich paliw ciekłych, bez powstawania podczas spalania WWA i sadzy, co w konsekwencji powoduje że płomień nie „kopci”, a wydobywający się z komina dym jest „biały”, a nie „czarny” jak w przypadku innych typów palników, również dwuczynnikowych. Palniki o rozczłonkowanej bryle płomienia posiadają zdecydowanie lepsze warunki aerodynamiczne do właściwego doprowadzania i wymieszania utleniacza z paliwem oraz eliminują obszary wysokich temperatur, niezależnie od wydajności palnika, co sprzyja obniżeniu szybkości powstawania NOx.
  11. Gazodynamiczny palnik olejowy z wewnętrznym mieszanym daje możliwość dowolnego formowania geometrii żagwi płomienia wg geometrii komory spalania i potrzeb technologicznych. Żagiew płomienia spalanej gliceryny technicznej może być symetryczna względem osi palnika lub może przyjmować dowolną konfigurację geometryczną. Długość płomienia może się zmieniać od 1,5 do 5m, a szerokość od 1 do 3,5m. Żagiew może być wydłużona lub przyjmować kształt krzaczasty lub płaski. Może być stosowana w komorach kotłów energetycznych lub w piecach technologicznych.
  12. Osiągnięte rezultaty techniczne, eksploatacyjne, niezawodnościowe i ekonomiczne w odniesieniu do wyników osiąganych przez inne krajowe firmy palnikowe i znane firmy zagraniczne, zdecydowanie przemawiają na korzyść palników gazodynamicznych typu „K” i stawiają opracowany i wdrożony przez nas układ w czołówce osiągnięć światowych. Osiągnięte wyniki eksploatacyjne pozwalają stwierdzić że zastosowanie gazodynamicznych palników z wewnętrznym mieszanym typu „K” jest idealnym rozwiązaniem problemu termicznej utylizacji uwodnionej gliceryny technicznej do celów energetycznych.