Henryk Karcz,
Politechnika Wrocławska, Instytut Techniki Cieplnej i Mechaniki Płynów
Agnieszka Kosiorek,
ZBUS Combustion
Jan Butmankiewicz, Dariusz Maciejak,
TKW Combustion

Możliwość opalania kotłów energetycznych roztworem wodnym mieszanek oleju rzepakowego z olejami ropopochodnymi

Biopaliwa są na świecie coraz częstszym źródłem energii odnawialnej. Wymusiły to względy ekonomiczne oraz polityczno-ekonomiczne. Na razie tradycyjne paliwa ropopochodne są jednak cenowo bezkonkurencyjne. Biopaliwom konieczne jest finansowe wsparcie ich produkcji i dogłębne poznanie skutków ich stosowania w sektorze energetyczno-paliwowym. Szczególnie ważną dziedziną badań są mieszanki olejów roślinnych z olejami ropopochodnymi. Przeprowadzone badania własności fizykochemicznych i energetycznych mieszanek oleju rzepakowego z olejem opałowym i mazutem oraz ich roztworów wodnych wykazały, że są one pełnowartościowymi paliwami energetycznymi do opalania kotłów energetycznych.

Produkcja biopaliw z oleju rzepakowego i używanie ich do napędu wszelkiego rodzaju silników samochodowych z punktu widzenia ochrony środowiska ma fundamentalne znaczenie. Jest to bardzo ważna sprawa, ponieważ za zanieczyszczenie atmosfery, zwłaszcza w dużych aglomeracjach miejskich, odpowiedzialna jest motoryzacja. Na zachodzie Europy szacuje się, że z samochodowych spalin pochodzi około 70% tlenków azotu i 90% ołowiu. Problemu nie rozwiązuje stosowanie benzyny bezołowiowej, ponieważ wzrasta ilość pochodnych benzenu, dla usunięcia których potrzebne są katalizatory nowego typu.

Korzystnymi własnościami paliwa rzepakowego [1–3] w porównaniu z olejem napędowym są:

- poprawa własności smarnych paliwa,
- biodegradowalność w czasie 21 dni w przedziale około 98%,
- obniżenie emisji SO_2 i CO_2,
- obniżenie emisji CO, wielopierścieniowych węglowodanów aromatycznych (WWA) i sadzy,
- brak działania toksycznego na organizm ludzki,
- większe bezpieczeństwo przeciwpożarowe z uwagi na wysoką temperaturę zapłonu, około 170°C.

Rozwojowi produkcji biopaliw powinny służyć odpowiednie regulacje prawno-finansowe, dopracowanie technologii wytwarzania, udoskonalanie organizacji produkcji, poprawa ekonomii produkcji i dystrybucji, poprawa organizacji zbytu produktów ubocznych oraz docenienie i uwzględnienie kosztów ochrony środowiska.

Wprowadzenie ekopaliw do szerszego stosowania na rynku wymaga trwałych rozwiązań systemowych gwarantujących stabilność warunków produkcyjnych dla wszystkich podmiotów występujących na rynku i w jego otoczeniu.

Warunkiem niezbędnym do kształtowania polityki inwestycyjnej w przemyśle naftowym i rolnictwie jest określenie długoterminowej polityki fiskalnej, preferującej paliwa ekologiczne ze źródeł odnawialnych.

Zakładane, spodziewane efekty aktywizacji rynku ekopaliw, to:

- zmniejszenie obciążeń środowiska naturalnego poprzez zmniejszenie emisji związków siarki, tlenku węgla i pochodnych związków azotu oraz realizacja przyjętych zobowiązań międzynarodowych w sposób określony „Strategią rozwoju energetyki odnawialnej w Polsce",
- zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego poprzez dywersyfikację źródeł pozyskania surowców i miejsce produkcji energii,
- poprawa salda w bilansie handlowym kraju poprzez zmniejszenie importu paliw ciekłych,
- wprowadzenie na rynek ciekłych paliw silnikowych i energetycznych konkurencyjnych w stosunku do paliw ropopochodnych, a więc wprowadzenie antymonopolowego elementu konkurencji,
- rozwój rolnictwa przez wzrost produkcji na cele nieżywnościowe, zagospodarowanie znacznej części z 1,5 mln ha gruntów obecnie odłogowanych i gwarancja zbywalności upraw,
- aktywizacja obszarów wiejskich najbardziej obciążonych zjawiskiem bezrobocia,
- stymulacja rozwoju lokalnego i regionalnego poprzez powstanie nowych miejsc pracy i zatrudnienie bezpośrednio w nowych zakładach przetwórczych oraz zatrudnienie na rynku związanym z biopaliwami,
- wzrost produkcji krajowych wysokobiałkowych pasz z jednoczesnym ograniczeniem importu,
- dostosowanie rozwiązań krajowych dotyczących wykorzystania Odnawialnych Źródeł Energii do rozwiązań obowiązujących i planowanych w Unii Europejskiej.

W związku ze sprzecznymi opiniami, jakie przetoczyły się w ostatnim okresie w Polsce na temat stosowania biopaliw i ich komponentów w olejach napędowych dla silników z zapłonem samoczynnym dla biopaliwa poszukuje się nowych zastosowań. Zastosowania te nie powinny budzić żadnych zastrzeżeń natury technicznej, ekologicznej oraz ekonomicznej. O ile aspekt ekologiczny – zachowanie bilansu CO_2, obniżenie SO_2 i NO_x – nie budzi żadnego zastrzeżenia z uwagi na jednoznaczne wyniki uzyskane w dotychczasowych aplikacjach badawczych, to aspekt techniczny – osiągane moce, sprawność urządzeń, działanie korozyjne – nie jest jeszcze całkowicie wyjaśniony. Aspekt ekonomiczny może być zdecydowanie poprawiony, gdyż wykorzystanie oleju rzepakowego jako paliwa energetycznego będzie się odbywać w postaci surowej, bez żadnych nakładów na uszlachetnienie. Cena oleju rzepakowego jako paliwa energetycznego zbliży się wówczas znacznie do cen obecnie stosowanych olejów ropopochodnych.

Przy zrealizowaniu całkowitego i zupełnego spalania biopaliw w komorach kotłów nie ma zagrożenia korozją powierzchni ogrzewalnych kotła ani jakichkolwiek innych zagrożeń ekologicznych. Zagrożenia wystąpienia korozji lub szkód ekologicznych nie będzie wówczas, gdy zapewni się właściwą technologie procesu spalania, która zapewni całkowite i zupełne spalanie, oraz brak emisji substancji szkodliwych do otoczenia. Do spalania należy użyć palników o małej wrażliwości na lepkość kinematyczną rozpylanego oleju. Palnikami takimi, które są mało wrażliwe na wysoką lepkość kinematyczną i zapewnią całkowite i zupełne spalanie, są gazodynamiczne palniki z wewnętrznym mieszaniem [4–6].

Sposób przygotowania energetycznych paliw ciekłych

Proces przygotowania energetycznych paliw ciekłych w postaci mieszanki oleju ropopochodnego z olejem roślinnym charakteryzuje się tym, że olej ciężki zwany mazutem podgrzany do temperatury w zakresie t1 – t2 lub olej opałowy lekki o temperaturze t3 – t4 miesza się z olejem rzepakowym podgrzanym do temperatury t5 – t6, przy ciśnieniu mieszanych składników P1 – P2, w każdej proporcji najkorzystniej przy udziale oleju rzepakowego w powstałej mieszance w ilości X1 – X2. Mieszankę oleju ciężkiego mazutu z olejem rzepakowym lub oleju lekkiego opałowego z olejem rzepakowym o ciśnieniu P3 – P4 przy prowadzeniu procesu wysokociśnieniowego lub o ciśnieniu P5 – P6 przy prowadzeniu procesu niskociśnieniowego doprowadza się do mieszalnika końcowego, do którego jednocześnie doprowadza się roztwór koloidalny w proporcji do mieszanki olejowej od 600:1 do 200:1, a wytworzony w mieszalniku palny roztwór olejowo-wodny kieruje się do instalacji przykotłowej. Roztwór koloidalny otrzymuje się ze zmieszania wody ze środkiem powierzchniowo-czynnym zwanym emulgatorem jak 100:1, przy czym stosuje się emulgator o nazwie handlowej rokafenol N-5 i chemicznej eter nonylo-fenylo-polioksyetylenoglokolowy lub zamiennie środek o nazwie handlowej rokonol L-4 i nazwie chemicznej eter polioksyetylenowy alkohol [7–8].

Instalacja do przygotowania energetycznych paliw ciekłych z olejów ropopochodnych i roślinnych charakteryzuje się tym, że zawiera zespoły instalacji A, B, C, D i mieszalnik końcowy, z których zespół instalacji A zawiera zbiornik oleju ciężkiego zwanego mazutem lub oleju lekkiego opałowego, zawory odcinająco-regulacyjne, filtr, pompę olejową, bypass, przepływomierz, manometr i termometr. Zespół instalacji B zawiera zbiornik oleju rzepakowego, zawory regulacyjno-odcinające, filtr, pompę olejową, przepływomierz, manometr i termometr. Z zespołów A i B oleje doprowadza się do mieszalnika w zespole instalacji C, a następnie wytworzoną mieszankę olejową kieruje się do mieszalnika końcowego E, do którego doprowadza się roztwór koloidalny z zespołu instalacji D przewodem poprzez zawory regulacyjno-odcinające, pompę wodną, wodomierz, zawór regulacyjno-odcinający, manometr i termometr, natomiast zespół instalacji C zawiera zbiornik, mieszadło, nagrzewnicę, zawory regulacyjno-odcinające, manometr i termometr. Do wytwarzania palnego roztworu olejowo-wodnego jest stosowany mieszalnik jako ejektor strumieniowy lub mieszalnik rurowy lub mieszalnik wyposażony w zbiornik z mieszadłem.

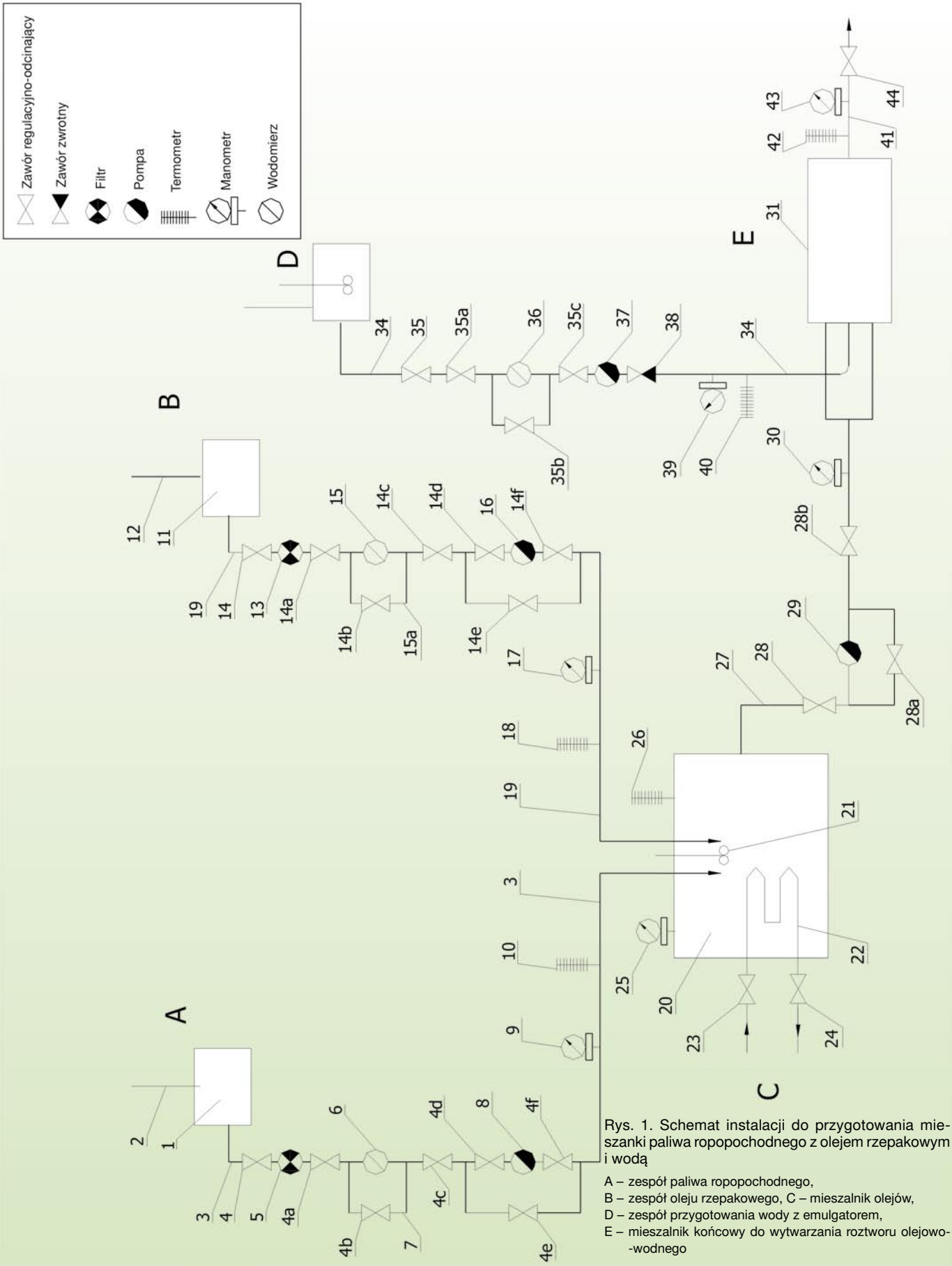
Sposób otrzymywania mieszanek jest dokładniej objaśniony za pomocą rysunku 1, na którym przedstawiono schemat instalacji do przygotowania energetycznego paliwa ciekłego.

Na rysunkach 2, 3, i 4 pokazano stosowane odmiany mieszalników końcowych [8] w instalacji jak na rysunku 1.

Przygotowanie energetycznego paliwa ciekłego w postaci mieszanki oleju ropopochodnego z olejem roślinnym obejmuje przygotowanie oleju ciężkiego zwanego mazutem i oznaczonego w dalszej części opisu jako olej M lub oleju lekkiego opałowego oznaczonego jako olej OP w zespole instalacji A oraz oleju rzepakowego oznaczonego jako olej OR w zespole instalacji B.

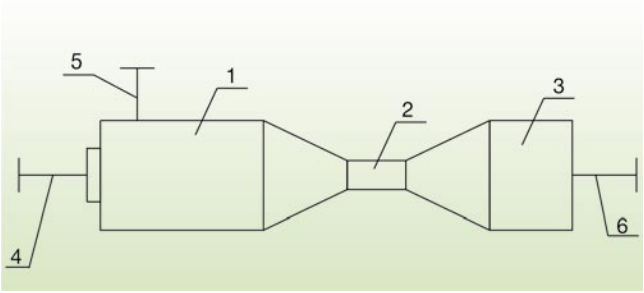
Do zbiornika 1 w zespole instalacji A doprowadza się olej M podgrzany przed wprowadzeniem do zbiornika 1 do temperatury t1 – t2, to jest 70 – 120°C lub olej OP podgrzany do temperatury t3 – t4, to jest 10 – 30°C, a następnie olej M lub olej OP przy ciśnieniu P1 – P2, to jest 0,01 – 0,2 MPa kieruje się do mieszalnika olejów w zespole instalacji C, w którym olej M podgrzewa się do temperatury t5 – t6, to jest 70 – 120°C, a olej OP do temperatury t7 – t8, to jest 20 – 40°C. Do tego samego mieszalnika olejów doprowadza się olej rzepakowy OR o temperaturze t9 – t10, to jest 20 – 60°C ze zbiornika w zespole B o takim samym ciśnieniu jak oleju M i oleju OP, to jest 0,1 – 0,2 MPa w każdej proporcji do oleju M lub OP najkorzystniej z udziałem oleju rzepakowego w mieszance olejowej od 5 – 20%.

Wytworzoną mieszankę M + OR lub OP + OR z instalacji C kieruje się do mieszalnika końcowego 31 pod ciśnieniem P3 – P4, to jest 2 – 4MPa przy prowadzeniu procesu wysokociśnieniowego lub pod ciśnieniem P5 – P6, to jest 0,6 – 2,0MPa przy prowadzeniu procesu niskociśnieniowego. Do mieszalnika końcowego 31 doprowadza się jednocześnie z mieszanką M + OR lub OP + OR roztwór koloidalny oznaczony dalej jako roztwór RK o temperaturze t11– t12, to jest 20 – 30°C w proporcji do mieszanek olejowych od 600:1 do 200:1, przy czym roztwór koloidalny przygotowuje się w zespole instalacji D. Do zbiornika 32 w zespole instalacji D doprowadza się wodę i środek powierzchniowo-czynny zwany dalej emulgatorem Eg w proporcji H_2O:Eg jak 100:1 i po zmieszaniu wytworzony roztwór koloidalny kieruje się do mieszalnika końcowego 31, z którego palny roztwór olejowo-wodny powstały ze zmieszania M + OR + H_2O + Eg lub ze zmieszania OP + OR + H_2O + + Eg kieruje się do instalacji przykotłowej.

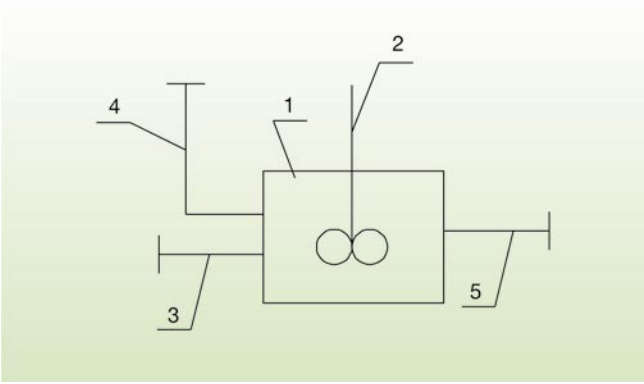


Rys. 1. Schemat instalacji do przygotowania mieszanki paliwa ropopochodnego z olejem rzepakowym i wodą

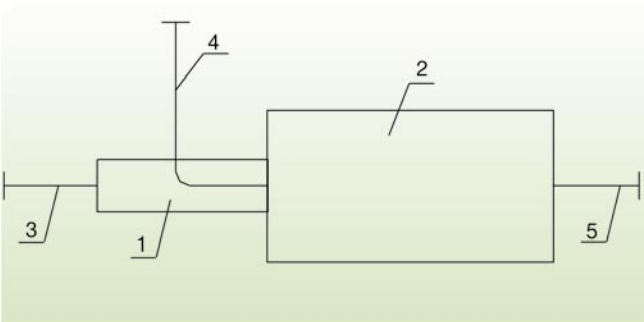
A – zespół paliwa ropopochodnego,
B – zespół oleju rzepakowego, C – mieszalnik olejów,
D – zespół przygotowania wody z emulgatorem,
E – mieszalnik końcowy do wytwarzania roztworu olejowo-wodnego



Rys. 2. Mieszalnik ejekcyjny strumieniowy
1 – komora zasilania, 2 – dysza, 3 – komora mieszania, 4 – rurociąg olejowy, 5 – rurociąg wody z emulgatorem, 6 – rurociąg roztworu olejowo-wodnego



Rys. 3. Mieszalnik śmigłowy
1 – zbiornik mieszalnika, 2 – śmigło, 3 – rurociąg olejowy, 4 – rurociąg wody z emulgatorem, 5 – rurociąg roztworu olejowo-wodnego



Rys. 4. Mieszalnik rurowy
1 – komora wstępnego mieszania, 2 – komora mieszania, 3 – rurociąg olejowy, 4 – rurociąg wody z emulgatorem, 5 – rurociąg roztworu olejowo-wodnego

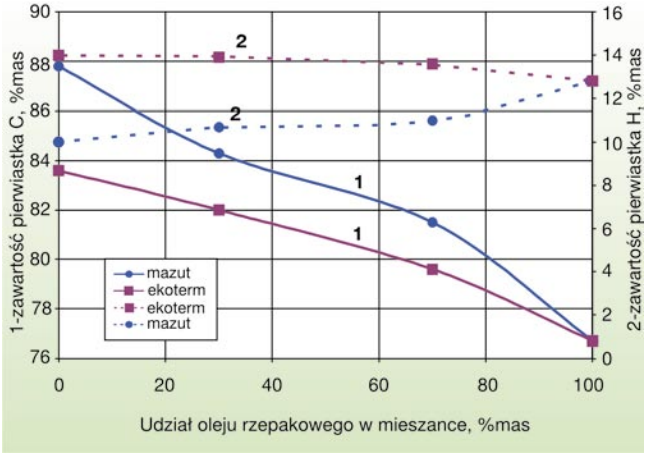
Mieszanki oleju rzepakowego z mazutem i olejem opałowym

Własności fizykochemiczne mieszanin mazutu M, oleju opałowego – Ekoterm z olejem rzepakowym w stosunku 90/10, 70/30, 30/70 wykazały, że w temperaturze pokojowej zarówno mazut jak i olej opałowy miesza się z olejem rzepakowym w każdej proporcji. W przypadku oleju opałowego uzyskanie jednorodnej mieszaniny znacznie się skraca, gdy temperatura podgrzewu obu składników wynosi 40 – 50°C.

Wszystkie mieszanki oleju opałowego z olejem rzepakowym po dwóch tygodniach przechowywania w temperaturze otoczenia są klarowne, jednorodne i nie wykazują oznak zmętnienia i rozwarstwiania się. Podobne cechy wykazują mieszanki oleju rzepakowego z mazutem.

Wyniki badań mieszanek oleju rzepakowego z olejem opałowym i mazutem wykazały, że poszczególne parametry są addytywne. W przypadku mazutu i jego mieszanek zawartość pierwiastka C maleje, a zawartość wodoru rośnie. Odwrotna tendencja występuje w przypadku wodoru dla oleju opałowego (rys. 5).

Występuje również wyraźne obniżenie zawartości siarki całkowitej w mieszankach w porównaniu z surowym mazutem i olejem opałowym (tab. 1). Jest to czynnik bez wątpienia korzystny, biorąc pod uwagę aspekty ekologiczne i technologiczne. Czynnik ten jest szczególnie ważny w przypadku oleju opałowego i jego mieszanek z olejem rzepakowym, które mogą spełniać funkcję paliwa podstawowego przy opalaniu kotłów komunalnych i ciepłowniczych.



Rys. 5. Zawartość węgla (1) i wodoru (2) w badanych surowcach i mieszankach z olejem rzepakowym

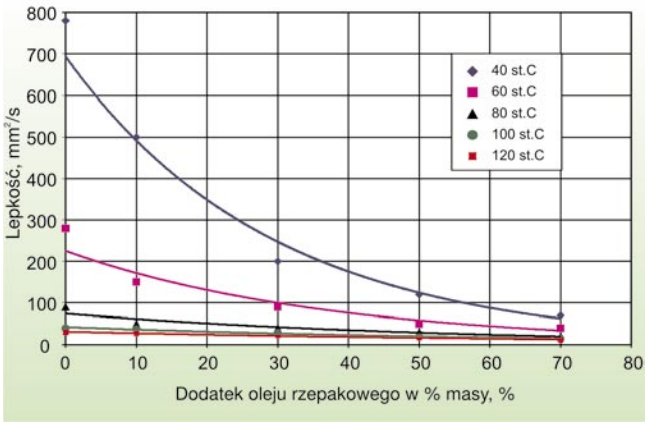
Tabela 1

Skład elementarny i ciepło spalania materiałów wyjściowych: mazutu, oleju opałowego i ich mieszanek z olejem rzepakowym

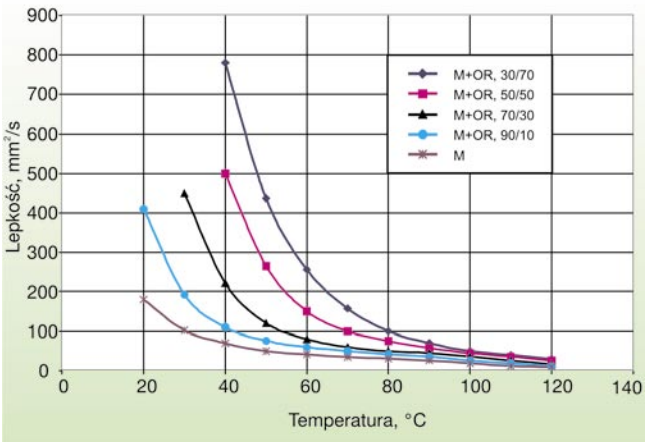
	C^a_t, %	H^a_t, %	N^a_t, %	S^a_t, %	Q^r_s, kJ/kg	Q^a_i, kJ/kg
M	87,71 87,60	10,06 10,52	1,65 1,15	1,38 1,15	43 047	40 831
M+OR, 70/30	83,92 84,77	10,81 10,63	0,59 0,65	0,74	42 037	39 677
M+OR, 30/70	80,94 80,81	11,18 11,11	0,59 0,58	0,39 0,37	40 548	38 123
E	83,58 83,26	13,92 13,76	0,69 0,73	0,52 0,21	45 305	42 284
E+OR, 70/30	82,35 81,91	14,00 13,83	0,14 0,13	0,12 0,07	43 775	40 738
E+OR, 30/70	79,19 79,62	13,17 13,38	0,26 0,39	0,04 0,06	41 360	38 461
OR	77,29 76,47	12,64 12,75	0,51 0,33	0,02 0,03	39 627	37 018

Wzrost udziału oleju rzepakowego w mieszankach z mazutem obniża lepkość kinematyczną mieszanki (rys. 6).

Im większy jest udział oleju rzepakowego, tym mniejsze są zmiany lepkości mieszanki ze wzrostem temperatury podgrzewu (rys. 7).



Rys. 6. Zależność lepkości kinematycznej mazutu od ilości oleju rzepakowego w mieszance

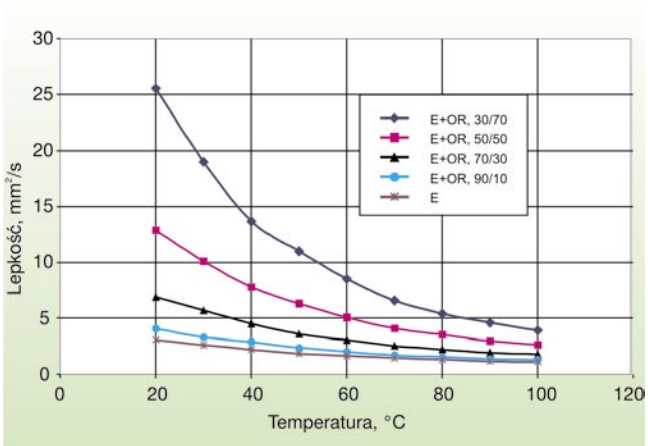


Rys. 7. Zależność lepkości kinematycznej mieszanki mazutu z olejem rzepakowym od temperatury podgrzewu

Aby uzyskać wysoką płynność mieszanek mazutu z olejem rzepakowym należy zastosować podwyższoną temperaturę albo zwiększyć udział oleju rzepakowego w mieszance.

W przeciwieństwie do mieszanek oleju rzepakowego z mazutem, mieszanki oleju opałowego charakteryzują się stosunkowo niską lepkością kinematyczną (rys. 8).

Im wyższa jest temperatura podgrzewu, tym ilość dodatku oleju rzepakowego ma mniejszy wpływ na poziom lepkości kinematycznej. Przy temperaturach mieszanki powyżej 70°C zawartość oleju rzepakowego nie ma już praktycznego wpływu na lepkość kinematyczną w rozumieniu zasilania palników olejowych dowolnej konstrukcji. Lepkość mieszanek oleju opałowego przy udziale oleju rzepakowego poniżej 20% w niewielkim stopniu zależy od temperatury mieszaniny i jest zbliżona do lepkości czystego oleju.



Rys. 8. Zależność lepkości kinematycznej od temperatury dla mieszanin oleju opałowego z olejem rzepakowym

Własności fizykochemiczne i energetyczne mieszanek oleju rzepakowego z olejem opałowym oraz mazutem mają charakter addytywny, są jednorodne chemicznie i fizycznie, nie występują zjawiska koagulacji, rozwarstwienia i zmętnienia przez okres co najmniej dwóch tygodni w temperaturze otoczenia. Mieszanki mogą być wykonywane w dowolnych proporcjach.

W zależności od użytych komponentów, od udziału oleju rzepakowego, mieszanka musi być podgrzewana do takiej temperatury, która zapewni płynność (lepkość) konieczną do dobrego rozpylania w danej konstrukcji palnika. Ogólnie można stwierdzić, że dodatek oleju rzepakowego do oleju opałowego – Ekoterm pogarsza w niewielkim stopniu sprawność spalania w porównaniu z czystym olejem opałowym, a w przypadku mazutu mieszanka spala się co najmniej jak czysty mazut. Mieszanki oleju rzepakowego, niezależnie z jakim paliwem ciekłym są mieszane, w istotny sposób poprawiają aspekt ekologiczny.

Największym mankamentem mieszanek oleju rzepakowego z olejem opałowym i mazutem jest zdecydowany wzrost ceny za jedną tonę mieszanki jako paliwa energetycznego. Cenę takiego paliwa można nieco obniżyć przynajmniej o 10% w przypadku wytworzenia mieszanek z wodą.

Cena mieszanek oleju opałowego z olejem rzepakowym wzrasta niewiele, lecz pogarsza się sprawność spalania, z kolei cena mieszanek mazutu z olejem rzepakowym rośnie dość znacznie, tym więcej im większy jest udział oleju rzepakowego, lecz bez pogorszenia procesu spalania.

Pewne możliwości poprawy sytuacji ekonomicznej oraz poprawę rozpylania i spalania można uzyskać przy dodatku do mieszanek oleju rzepakowego z olejem opałowym i mazutem pewnej ilości wody.

Poprawę stopnia rozpylenia paliw ciekłych i poprawę szybkości doprowadzenia tlenu do strefy odparowania oraz poprawę szybkości utworzenia jednorodnej mieszanki palnej można uzyskać poprzez wytworzenie stabilnej mieszaniny koloidalnej oleju z wodą. Utworzenie trwałej, nierozdzielającej się w czasie mieszaniny olejowo-wodnej o strukturze koloidalnej z zawartością wody do 13% daje możliwość znacznej poprawy w strukturze wymiarowej kropel oraz jednorodnego rozłożenia ich w obszarze przylegającym do dyszy palnika.

Otrzymana mieszanina olejowo-wodna nie jest emulsją, lecz stabilnym, nierozwarstwiającym się koloidalnym roztworem wody w oleju na poziomie cząsteczkowo-jonowym o stopniu rozdrobnienia poniżej 10^{-5} cm o równomiernie rozłożonych cząsteczkach w objętości mieszaniny. Dodatek związków powierzchniowo-czynnych powoduje, że energia cząsteczek oleju i wody w mieszaninie jest na tyle znaczna, że poszczególne frakcje tych cząsteczek są wystarczająco trwałe i nie ulegają rozpadowi w podwyższonej temperaturze i na drodze mechanicznej [7–15].

Ponieważ w utworzonym roztworze koloidalnym znajdują się cząsteczki wody, roztwór olejowy jest częścią palną zawierającą duże ilości cząsteczek tlenu, ponieważ w wodzie jest prawie cztery razy więcej tlenu niż w powietrzu.

Palny roztwór olejowo-wodny zawierający stosunkowo duże ilości tlenu wewnętrznego charakteryzuje się wysoką reakcyjnością, która jest charakterystyczną cechą paliw ciekłych o bardzo wysokiej szybkości spalania oraz spalaniu całkowitym i zupełnym.

Palny roztwór olejowo-wodny wymaga do spalenia mniejszej ilości doprowadzonego powietrza, w wyniku czego powstaje korzystniejszy bilans pomiędzy powietrzem niezbędnym do spalania i powietrzem doprowadzonym, co znacznie obniża straty ciepła na nagrzew balastowego azotu.

Obecność cząsteczek wody w roztworze olejowo-wodnym przejawia się w dwojaki sposób w mechanizmie spalania.

Po pierwsze, w przypadku spalania mieszaniny mazutu z olejem rzepakowym, przy ogrzewaniu roztworu do temperatury 120–130°C stan fizyczny cząsteczek wody ulega zmianie. Temperatura wrzenia wody jest o około 170–220°C niższa od temperatury wrzenia mazutu. W wyniku tego część palna roztworu pozostaje jeszcze w stanie ciekłym, a woda przechodzi w stan pary. Dzięki temu kropla roztworu pod działaniem rozszerzającej się pary wodnej ulega rozszczepieniu na części na drodze mikroeksplozji. Takie dodatkowe rozdrobnienie kropli zwiększa szybkość procesu spalania mieszanki poprzez zwiększenie ogólnej powierzchni parujących elementów paliwa.

Po drugie, następuje poprawa procesu mieszania paliwa z tlenem, wzrasta wpływ katalitycznego oddziaływania pary wodnej na spalanie mieszanki. Cząsteczki wody podczas spalania roztworu mieszanki uczestniczą w procesach utleniania i redukcji cząsteczek gazów węglowodorowych. Rozpad termiczny cząsteczek wody powoduje powstanie rodników OH, które oddziałują katalitycznie w procesie wstępnego utleniania węglowodorów ciężkich i sadzy. W temperaturach większych od 850°C rozżarzone cząsteczki węgla w obecności rodnika OH łatwo ulegają utlenieniu do tlenku węgla. Przerwany zostaje w ten sposób proces powstawania sadzy w płomieniu i odkładania się części smolistych w postaci nagaru na powierzchniach ogrzewalnych komory spalania. Powstały w czasie termicznej dysocjacji cząsteczek wody wodór ulega spaleniu w jądrze płomienia, powodując ogólny wzrost szybkości spalania mieszanki. Żagiew płomienia jest w wyniku tego bardziej zwarta i stabilna niż w przypadku spalania czystego mazutu, oleju opałowego czy ich mieszanek z olejem rzepakowym. W wyniku całkowitego i zupełnego spalania w spalinach nie ma sadzy i ciężkich węglowodorów aromatycznych, a na powierzchniach ogrzewalnych nie odkłada się nagar, dzięki czemu zmniejsza się zabrudzenie rur ekranowych komory spalania.

Dzięki stosowaniu koloidalnego roztworu olejowo-wodnego uzyskuje się całkowite i zupełne spalanie, poprawę wymiany ciepła w komorze spalania, zmniejszenie korozyjnego wpływu spalin na powierzchnie ogrzewalne kotła oraz oszczędności paliwa ciekłego. W wyniku tych efektów można realnie zmniejszyć zużycie oleju na przeprowadzenie konkretnych procesów technologicznych o 10–15%, tzn. spalanie koloidalnego roztworu olejowo-wodnego jest bardziej ekonomiczne niż spalanie czystych mieszanek oleju rzepakowego z olejem opałowym lub mazutem.

Badania procesu zapłonu mieszanek oleju rzepakowego

Metodyka i sposób badań procesu zapłonu paliw ciekłych w palnikach olejowych został dokładnie przedstawiony w pracach [90–11]. Badania procesu zapłonu zostały przeprowadzone przy pomocy palnika o wydajności 1000 kg/h oleju na stanowisku badawczym opisanym w pracach [12–17].

Zapłon paliw ciekłych

Najbardziej intensywny nagrzew wypływającego paliwa występuje na peryferiach strugi, gdzie intensywność odparowania powstałych kropel jest największa. Wypływająca struga nagrzewa się na skutek zasysania z otaczającego ośrodka produktów spalania o wysokiej temperaturze. Krople paliwa nagrzewają się dzięki konwekcyjnej wymianie ciepła w strumieniu gorących gazów w warunkach turbulentnej dyfuzji, a także na skutek promieniowania tychże gazów.

Najbardziej intensywny nagrzew strugi występuje na jej peryferiach, dzięki czemu intensywne odparowanie kropel paliwa jest największe. Dla powstałej mieszaniny palnej głównymi właściwościami, które limitują zapłon oraz wyznaczają normalną prędkość rozprzestrzeniania się płomienia, jest jej skład chemiczny, temperatura i ciśnienie. Paliwo znajdujące się w centralnej części nagrzewa się wolniej i odparowuje w bardziej odległych przestrzeniach strugi. Zapłon strugi następuje w pewnej odległości od dyszy, tam gdzie powstaje mieszanka palna i gdzie panuje dostateczna temperatura dla zapłonu. Warunki te występują w czole frontu płomienia.

Pewność zapłonu P_z

Zapłon paliw ciekłych spalanych przy pomocy palników gazodynamicznych z wewnętrznym mieszaniem odbywa się przy pomocy wysokoenergetycznej zapalarki elektrycznej zasilanej prądem o napięciu 220 V bezpośrednio w pobliżu głowicy palnika [9–10]. Wytwarzana pomiędzy elektrodami zapalarki iskra elektryczna o energii 10 J posiada wystarczającą moc do zapłonu mieszanki paliwowej powstałej w przestrzeni wokół czoła głowicy palnika. Dla zapłonu paliwa energia iskry elektrycznej, jej częstotliwość przeskoku i czas trwania jest ściśle uzależniona od składu powstałej mieszaniny gazów i par węglowodorowych.

Pewność zapłonu mieszanki P_z przy pomocy iskry elektrycznej o określonych parametrach (10 J, 4–5 iskier na sekundę) jest ściśle związana ze składem i koncentracyjnymi granicami zapłonu oraz własnościami kinetycznymi powstałej mieszanki palnej w przestrzeni działania iskry elektrycznej [18–25]. Powstała mieszanka palna w odległości h od płaszczyzny wylotowej głowicy palnika posiada optymalne warunki do zapłonu. Odległość ta jest ściśle uzależniona od rodzaju spalanego paliwa, technologii rozpylania, parametrów termodynamicznych spalanego paliwa (temperatura, ciśnienie); rodzaju użytego czynnika rozpylającego (para lub powietrze) i jego parametrów termodynamicznych w przypadku palników dwuczynnikowych oraz sposobu doprowadzenia powietrza do spalania [25]. 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, o tyle zapłon mieszanki następuje w obszarze pomiędzy jej dolną a górną granicą zapłonową. Pewność zapłonu P_z jest najwyższa w przedziale stężeń, gdzie normalna prędkość spalania mieszanki gazowej jest maksymalna.

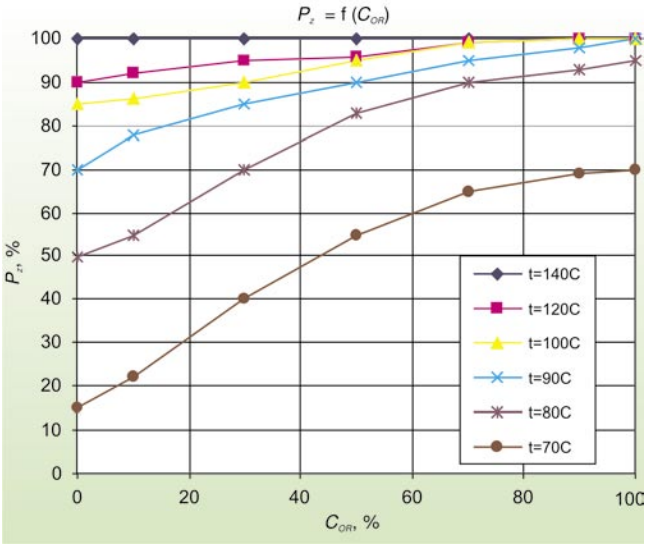
Pewność zapłonu P_z określana jest jako procentowa skuteczność zapłonu paliwa przy pomocy iskry elektrycznej o energii 10 J i częstotliwości 5–6 iskier na sekundę. Pewność zapłonu określa się w stosunku do 10 lub 20 prób zapłonowych. Ilość skutecznych prób w stosunku do ilości programowo założonych prób, określono jako pewność zapłonu P_z.

W czasie badań nad skutecznością zapłonu mieszanek oleju rzepakowego OR z mazutem M oraz oleju rzepakowego OR z olejem opałowym E elektrody zapalarki umieszczone były w odległości h od czoła głowicy, określonej jako odległość optymalna dla czystego mazutu M, czystego oleju opałowego E i czystego oleju rzepakowego OR. Dla danej mieszanki paliwowej optymalna odległość h znajdowała się zawsze pomiędzy odpowiednimi wartościami h dla mazutu, oleju rzepakowego oraz oleju opałowego i oleju rzepakowego.

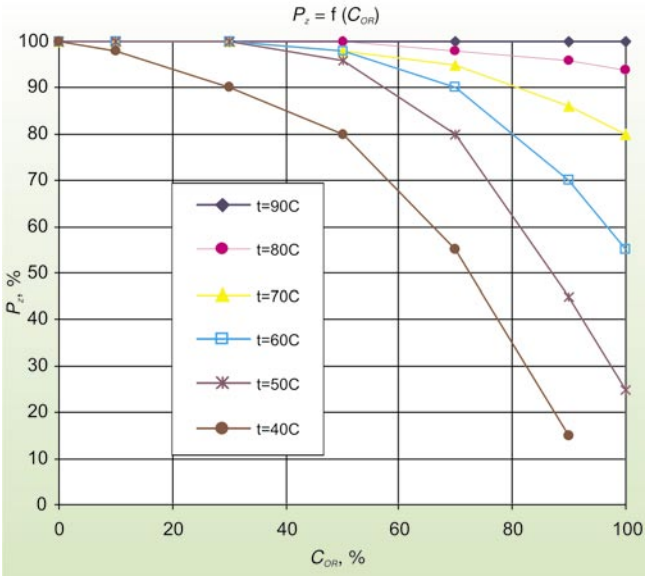
Wyniki badań nad skutecznością zapłonu mieszanek oleju rzepakowego z mazutem w zależności od procentowego udziału oleju rzepakowego i temperatury mieszanki przedstawiono na rysunku 9, a dla mieszanek oleju opałowego z olejem rzepakowym na rysunku 10.

Pewność zapłonu mieszanek mazutu M z olejem rzepakowym OR rośnie ze wzrostem udziału oleju OR w mieszance i ze wzrostem temperatury mieszanki.

Dla mieszanek o udziale oleju OR powyżej 50% i temperaturach podgrzewu powyżej 100°C pewność zapłonu jest blisko 100%. Dodatek oleju OR do mazutu M w zdecydowany sposób powiększa pewność zapłonu P_z niezależnie od temperatury podgrzewu. Odmiennie zachowują się mieszanki oleju opałowego E z olejem rzepakowym OR. Dodatek oleju OR do mieszanki powoduje obniżenie pewności zapłonu. Dodatek oleju OR powyżej 50% obniża w zdecydowany sposób pewność zapłonu, w tym większym stopniu im niższa jest temperatura podgrzewu. Temperatura mieszanki powyżej 70°C zapewnia wysoką pewność zapłonu niezależnie od udziału OR w mieszance. Dla niskich temperatur podgrzewu i wysokich udziałów OR, pewność zapłonu jest bardzo niska i praktycznie zapłon iskrowy nie może być ze względów eksploatacyjnych brany pod uwagę.



Rys. 9. Zależność pewności zapłonu P_z od udziału oleju rzepakowego C_{OR} w mieszance z mazutem i od temperatury mieszanki t
1 – t = 140°C, 2 – 120°C, 3 – 100°C, 4 – 90°C, 5 – 80°C, 6 – 70°C

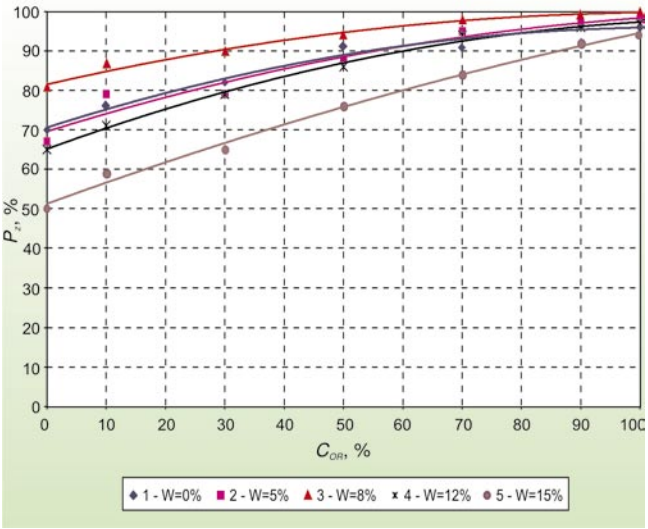


Rys. 10. Zależność pewności zapłonu P_z od udziału oleju rzepakowego C_{OR} w mieszance z olejem opałowym – Ekoterm i od temperatury mieszanki t
1 – t = 90°C, 2 – 80°C, 3 – 60°C, 4 – 50°C, 5 – 40°C

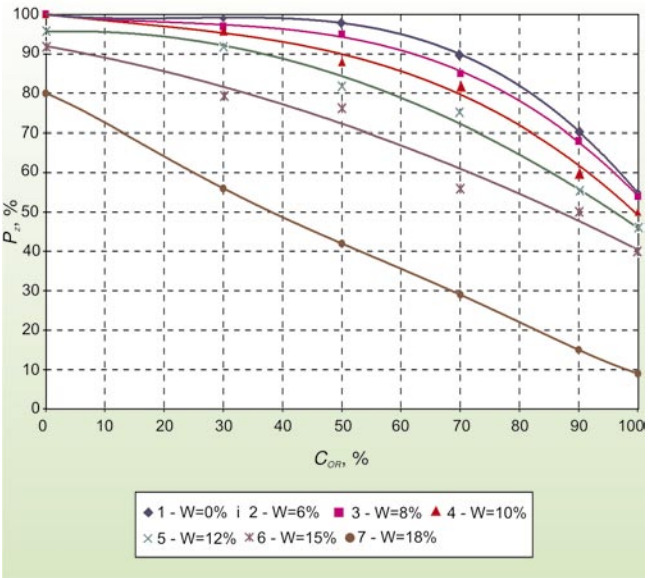
Dodatek wody (W) do mieszanek M + OR lub E + OR wpływa na zapłon powstałego roztworu olejowo-wodnego zależnie od zawartości oleju OR, rodzaju oleju ropopochodnego i procentu dodatku wody i temperatury mieszanki.

Ogólnie można stwierdzić, że pewność zapłonu P_z rośnie ze wzrostem zawartości OR w mieszance z mazutem i obniża się ze wzrostem zawartości wody powyżej 12%. Przy zawartości wody poniżej 12% w roztworze, pewność zapłonu niewiele różni się od P_z mieszanki M + OR niezależnie od procentu zawartości OR. Wyjątek stanowią roztwory o zawartości wody w przedziale 6–9% których pewność zapłonu (rys. 11) wyraźnie wzrasta niezależnie od zawartości OR w mieszance.

Roztwory o zawartości wody poniżej 6% charakteryzują się prawie taką samą pewnością zapłonu jak mieszanki M + OR bez dodatku wody i mieszanki z 10–12% zawartością wody. Dodatek wody powyżej 12% w zauważalny sposób obniża pewność zapłonu roztworu M + OR w tym większym stopniu im mniejsza jest zawartość OR (rys. 11).



Rys. 11. Zależność pewności zapłonu P_z roztworu od udziału oleju rzepakowego C_{OR} i ilości wody
1 – W = 0%, 2 – W = 5%, 3 – W = 8%, 4 – W = 12%, 5 – W = 15%



Rys. 12. Zależność pewności zapłonu P_z roztworu od udziału oleju rzepakowego C_{OR} i ilości wody
1 – W = 0%, 2 – W = 6%, 3 – W = 8%, 4 – W = 10%, 5 – W = 2%, 6 – W = 15%, 7 – W = 18%

Wzrost temperatury roztworu w każdym przypadku zwiększa P_z niezależnie od innych parametrów. Temperatura mieszanki M + OR wywiera jednak swoje piętno na sposób przygotowania roztworów do zasilania palników.

W przypadku niskociśnieniowej technologii przygotowania roztworu (rys. 3) temperatura mieszanki M + OR musi być niższa od 100°C z uwagi na możliwość odparowania wody i wystąpienia zjawisk kawitacji, które powodują powstawanie pęcherzy parowych niszczących jednorodną strukturę roztworu M + OR + W. Technologie wysokociśnieniowe (rys. 2 i 4) dopuszczają temperatury M + OR w zakresie do 140°C.

Rysunek 11 został wykonany dla mieszanki M + OR o temperaturze 90°C. Dla tej temperatury mieszanki uzyskano wyniki o najmniejszym rozrzucie i największej powtarzalności.

Rysunek 12 został wykonany dla roztworu składającego się z mieszanki oleju opałowego E, oleju rzepakowego OR, wody W o temperaturze 60°C. Podobnie jak w przypadku mazutu badano wpływ zawartości OR w mieszance, zawartości wody W w roztworze oraz temperatury mieszanki na pewność zapłonu.

Wzrost ilości OR w mieszance E + OR obniża pewność zapłonu roztworu w tym większym stopniu im wyższa jest zawartość wody. Dla roztworów o zawartości wody powyżej 15% pewność zapłonu P_z maleje prawie proporcjonalnie do wzrostu OR w mieszance. Dodatek wody w ilości powyżej 18% powoduje praktycznie niepalność roztworu. Pewność zapłonu spada bardzo szybko ze wzrostem udziału OR w mieszance.

Zawartość wody w roztworze poniżej 8% w bardzo niewielkim stopniu wpływa na pewność zapłonu P_z. Przy zawartości wody w ilości 6% P_z roztworu nie odbiega od P_z czystej mieszanki E + OR. Temperatura mieszanki E + OR w roztworze wpływa podobnie na P_z jak w przypadku czystej mieszanki (rys. 10).

Wnioski

1. Mieszanki oleju rzepakowego z lekkim olejem opałowym i z olejem ciężkim stanowią trwałe mieszanki paliwowe nie ulegające rozwarstwieniu pod wpływem czasu.

2. Własności fizykochemiczne mieszanek oleju rzepakowego z lekkim i ciężkim olejem ropopochodnym zachowują addytywność w stosunku do własności komponentów.

3. Dodatek oleju rzepakowego do mazutu polepsza jego własności kinematyczne w tym większym stopniu, im większy jest jego udział masowy i wyższa temperatura podgrzewu mieszanki.

4. Olej rzepakowy poprawia dyspozycyjność ruchową mazutu jako paliwa energetycznego w zakresie pewności zapłonu i stabilności spalania.

5. Olej rzepakowy jako składnik mieszanki z olejem opałowym – Ekoterm pogarsza jego własności kinetyczne, szczególnie przy udziale większym jak 50% i niskich temperaturach podgrzewu.

6. Zapłon iskrowy mieszanek oleju opałowego z olejem rzepakowym przy temperaturach podgrzewu poniżej 40°C jest nieskuteczny i niepewny eksploatacyjnie.

7. Olej rzepakowy niezależnie od jego stanu chemicznego i fizycznego może być używany w wielkich kotłach energetycznych jako paliwo rozpałkowe do rozruchu.

8. Olej rzepakowy może z powodzeniem spełniać wymóg stawiany elektrowniom odnośnie do produkcji energii z Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) w zakresie regulowanym przez obowiązujące ustawy.

9. Roztwór wodny mieszanki mazutu z olejem rzepakowym przy zawartości wody 6–9% posiada znacznie lepsze własności kinetyczne od czystej mieszaniny M + OR.

10. Własności palne mieszanki M + OR nie ulegają pogorszeniu przy dodaniu wody do roztworu poniżej 12% udziału masowego. W tym zakresie wyraźnie poprawiają się parametry eksploatacyjne i emisyjne opalanego kotła.

11. Olej opałowy w mieszance z olejem rzepakowym może być z powodzeniem spalany w kotłach energetycznych jako roztwór wodny z dodatkiem wody poniżej 15% udziału masowego. W tym zakresie dodatku wody mieszanka E + OR może być spalana z bardzo wysoką sprawnością termiczną przy udziale OR poniżej 50%.

12. Stopień czystości chemicznej i mechanicznej oleju rzepakowego nie ma żadnego wpływu na proces zapłonu i spalania mieszanek oleju rzepakowego z olejami ropopochodnymi w roztworach wodnych.

LITERATURA

[1] Organista W. Kuczyk J.: Biopaliwo – paliwo rzepakowe, aspekty zastosowania do urządzeń małej mocy cieplnej. VI Ogólnopolska Konferencja naukowo-techniczna „Gospodarka cieplna i eksploatacja pieców przemysłowych". Pory k. Częstochowy, 1998

[2] Organista W.: Efektywność Energetyczna i emisja gazów spalinowych przy zastosowaniu do opalania urządzeń grzewczych paliwa z oleju roślinnego. Konferencja naukowo-techniczna „Energetyka 2000"

[3] Organista W.: Analiza zastosowania paliw pochodzenia roślinnego oraz mieszanin z olejem opałowym lekkim do opalania urządzeń grzewczych. Konferencja naukowo-techniczna. „Energetyka 2002", Wrocław 2002

[4] Karcz H. i in.: Palnik do spalania paliwa ciekłego. Patent nr 164172 z dnia 1.10.1990

[5] Karcz H. i in.: Palnik do spalania paliwa ciekłego. Patent nr 166575 z dnia 13.02.1992

[6] Wanatowicz St., Karcz H., Zembrzuski M.: Palnik do spalania paliwa ciekłego. Patent nr 150722 z dnia 30.01.1987

[7] Karcz H., Kosiorek A., Butmankiewicz T.: Sposób przygotowania i instalacja do przygotowania energetycznych paliw ciekłych. Zgłoszenie Patentowe P363546 z dnia 19.11.2003

[8] Karcz H., Butmankiewicz T., Ładogorski P., Bechtold Z.: „Sposób i układ instalacji przygotowania paliw ciekłych do spalania. Zgłoszenie Patentowe P359229 z dnia 03.19.2003

[9] Karcz H., Sikorski W., Adynowski J., Sokołowski P.: Zapłon ciężkich paliw płynnych w komorach kotłów energetycznych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej* Nr 225/2000, z 49 ss 219 – 229 GRE 2000 VII Forum Energetyków „Pod Szyndzielnią", Opole 2000

[10] Karcz H., Adynowski J., Sokołowski P.: Systemy zapłonu palników olejowych. *Prace Naukowe Instytutu Techniki Cieplnej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej* nr 56, Seria *Konferencje* nr 10 ss 399–406. „Energetyka 2000", Wrocław, 8–10 listopada 2000

[11] Karcz H., Zembrzuski. M.: A new concept of low pressure atmosphere, XI-th International Symposium on Combustion Processes. Międzyzdroje, September 1989

[12] Stańda J., Karcz H., Jodkowski W.: Neue Zundsysteme dermit schweren flussigen Brennstoffen gespensten Brener in Kraftwerkskessein XXXII

[13] Karcz H., Butmankiewicz T., Adydryjowicz Cz.: Stabilność eksploatacyjna palników olejowych. *Prace Naukowe ITC i MP Politechniki Wrocławskiej* nr 56, Seria *Konferencje* nr 10, Wrocław, 8–10 listopada 2000

[14] Karcz H., Andryjowicz Cz., Przegaliński K.: Stabilność i pewność eksploatacyjna palników olejowych wielkiej mocy. *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej*. Seria *Elektryka* nr 255/2000 z 49, ss 197–205

[15] Karcz H., Sikorski W., Przegaliński K., Butmankiewicz J.: Problemy stabilności płomieni olejowych w palnikach wielkiej mocy, Krajowa Konferencja Energetyczna, Poznań-Rydzyna 20–22 października 1999

[16] Wojtiuk Zb.: Wdrożenie i eksploatacja olejowych palników rozpałkowych TKW Combustion na kotłach OP-380 nr 1,2 oraz OP-430 nr 4 w *Elektrociepłowni Kraków SA*. Seminarium naukowo-techniczne w *EC Kraków* pt. „Instalacje olejowych palników rozpałkowych wraz z systemem dozoru płomienia w kotłach energetycznych". Kraków, maj 1999

[17] Kowalewicz A.: Tworzenie mieszanki i spalania w silnikach o zapłonie iskrowym. KKiŁ, Warszawa 1984

[18] Law C.K.: Recent dawances in droplet vaporization and combustion. Prog. In Energy and Combust. *Science*, Vol. 8, 1982

[19] Faeth G.M.: Current status of droplet and liquid combustion. Prog. In Energy and Combust. *Science*, Vol. 3, 1997

[20] Wilk R.: Badania zjawiska spalania kropli ciężkiego paliwa ciekłego. *Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej,* seria *Energetyka* nr 81, Gliwice 1982

[21] Kulagin L.V.,Ochotnikov S.S.: Sziganie tjażelych żidkich topliv, Nedra, Moskwa 1967

[22] Williams FR.A.: Teorija gorenija, Izd. Nauka, Moskwa 1971

[23] Wilk R., Zaliński Z.: Badania czsu spalania kropli ciężkiego paliwa. *Zeszyty naukowe Pol. Śląskiej,* seria *Energetyka* nr 79, Gliwice 1982

[24] Petela R.: Paliwa i ich spalania, G.V. Laboratorium, Politechnika Śląska, Gliwice 1984

[25] Karcz H., Sokołowski P. Jodkowski W.: Wpływ usytuowania zapalarki elektrycznej na skuteczność zapłonu ciężkich paliw płynnych. Konferencja naukowo-techniczna „Elektrownie cieplne, eksploatacja-modernizacja-remonty". Bełchatów 27–29 września 2001