

AKTUALNA KONCEPCJA WYKORZYSTANIA OLEJU RZEPAKOWEGO JAKO PALIWA

W artykule przeprowadzona została synteza wiedzy w zakresie wykorzystania oleju rzepakowego jako paliwa. Omówione zostały paliwa alternatywne do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. Wskazano dotychczasowe sposoby zmiany właściwości fizykochemicznych oleju rzepakowego zbliżające jego parametry fizykochemiczne do parametrów normatywnych oleju napędowego.

WSTĘP

Obecnie silnik spalinowy jest podstawowym źródłem napędu pojazdów samochodowych jak również innych środków transportu. Wg prognoz na lata 2020-2050 silnik spalinowy będzie podstawowym źródłem napędu pojazdów [7,42]. Głównym paliwem stosowanym do pojazdów silnikowych jest olej napędowy i benzyna, produkty pochodzące z przeróbki ropy naftowej. Zaostrzenie norm dotyczących emisji związków toksycznych spalin oraz niestabilna sytuacja na rynku paliw ropopochodnych zmuszają do prowadzenia prac w zakresie poszukiwania nowych rodzajów paliw do zasilania silników spalinowych. W odniesieniu do silników o zapłonie samoczynnym prace te prowadzone są głównie w zakresie pozyskiwania paliw nie pochodzących z rafinacji ropy naftowej tzw. paliw alternatywnych. Można już od dłuższego czasu zaobserwować pojazdy wyposażone w silnik o ZS zasilany gazem propan-butan (LPG) oraz gazem ziemnym (CNG i LNG) [30,31,33]. Pomimo wyraźnych korzyści ekonomicznych (niska cena paliwa gazowego) i ekologicznych (niższa emisja NO_x, CO i HC), pojazdy te wymagają dosyć kosztownych zmian konstrukcyjnych przystosowujących układy zasilania silnika do spalania tego typu paliwa. Problemem jest również usterkowość silników zasilanych paliwem gazowym ze względu na dużo wyższą temperaturę spalania [33]. Zasilanie silników o ZS paliwami alkoholowymi (metanol, etanol, butanol), eterami (ETT, DME, DEE) lub paliwami syntetycznymi nie jest powszechne i ogranicza się najczęściej do pojazdów lub silników badawczych [1,25,34,35]. Stosowanie alkoholi jako paliwa lub dodatku do ON jest utrudnione ze względu na małą zdolność do samozapłonu, słabą zdolność do mieszania się z olejem napędowym oraz wysoką higroskopijność (przejmują wilgoć z otoczenia), a więc dla uzyskania stabilnych mieszanin oleju napędowego i alkoholu trzeba stosować odpowiedni emulgator. Pośród alkoholi najczęściej stosowany jest etanol ponieważ ma przewagę nad metanolem w zakresie wartości opałowej. Aby rozwiązać ten problem prowadzi się badania nad tworzeniem mikroemulsji, składającej się z nierozpuszczalnych cieczy tj. oleju roślinnego oraz metanolu, etanolu lub jonowego, niejonowego związku amfifilowego [1,24,34]. Na szczególną uwagę zasługują paliwa pochodzące z roślin oleistych (olej palmowy, olej kokosowy, olej rzepakowy, olej sojowy, olej lniany, olej z orzeszków ziemnych). Oleje roślinne należą do grupy paliw niekonwencjonalnych ciekłych. Paliwa roślinne i ich estry uzyskuje się z nasion roślin. W polskich warunkach jest to olej rzepakowy, który można stosować do zasilania silnika o zapłonie samoczynnym. Prace

badawcze w zakresie stosowania oleju rzepakowego jako paliwa prowadzone były na jeden z trzech sposobów: po przeróbce na biodiesel (FAME), jako samodzielne paliwo lub mieszanka z olejem napędowym lub innymi dodatkami [5,10,11,31,47]. Stosowanie paliw roślinnych, w tym oleju rzepakowego niesie ze sobą wady i zalety w wybranych aspektach. Do korzyści ekologicznych zalicza się fakt zamkniętego obiegu CO₂ w atmosferze i związane z tym ograniczenie efektu cieplarnianego, niską zawartość siarki (do 0,05%), biodegradowalność, dużą zawartość tlenu związanego. Ponadto uważa się, że stosowanie oleju rzepakowego powoduje zmniejszanie zawartości NO_x w spalinach [3,16,47]. W aspekcie ekonomicznym można wyróżnić możliwość produkcji na własne potrzeby w rolnictwie i małych zakładach produkcyjnych, zrównoważony rozwój obszarów wiejskich, zagospodarowanie ugorowanych terenów, wzrost bezpieczeństwa energetycznego kraju poprzez wzmocnienie krajowego rynku biopaliw. W artykule autorzy podjęli próbę usystematyzowania wiedzy na temat wykorzystania olejów roślinnych, z uwzględnieniem oleju rzepakowego, jako paliwa do silników o zapłonie samoczynnym m.in.[1,24,30,31,47].

1. DOTYCHCZASOWE WYKORZYSTANIA OLEJU RZEPAKOWEGO JAKO PALIWO

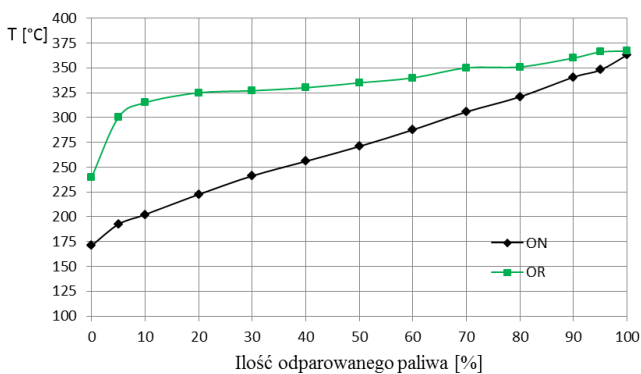
Historia produkcji biopaliwa otrzymywanego z roślin oleistych sięga początku ubiegłego wieku. Po raz pierwszy oleje roślinne (olej arachidowy) jako paliwo zastosował Rudolf Diesel w skonstruowanym przez siebie silniku. Dopiero później po nieudanych próbach z olejem roślinnym, do zasilania silnika zastosowano paliwo otrzymywane z ropy naftowej. Problemy w zastosowaniu oleju rzepakowego jako paliwa są powszechnie znane i obszernie opisane w literaturze. Największe różnice można wskazać we własnościach fizykochemicznych oleju rzepakowego w stosunku do oleju napędowego. Wiele prac dostępnych w literaturze fachowej poświęcono temu zagadnieniu m.in. [4,5,6,11,10,19,22,28,31,38,41,43,47].

Autorzy artykułu w badaniach własnych określili podstawowe własności fizykochemiczne oleju rzepakowego i oleju napędowego, które przedstawiono w tabeli 1. Badanym olejem napędowym był olej Ekodiesel Plus w odmianie letniej firmy Orlen. Natomiast badanym olejem rzepakowym był spożywczy olej rafinowany ogólnodostępny w handlu detalicznym (przybliżony wzór sumaryczny C₅₇H₁₀₁₊₆O₆).

Tab. 1. Podstawowe parametry fizykochemiczne oleju rzepakowego i oleju napędowego [22]

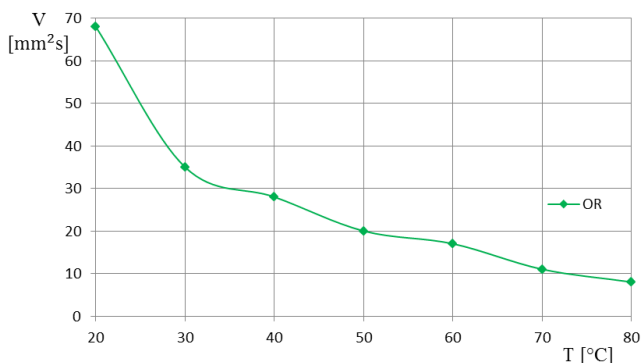
Rodzaj paliwa	Gęstość w temp. 20°C [kg/m ³]	Lepkość w temp. 40°C [mm ² /s]	Wartość opałowa [MJ/kg]	Napięcie powierzchniowe [mN/m]
ON	840	3,04	43,84	29,15
OR	916	19,85	37,10	37,10

Olej rzepakowy stosowany jako paliwo posiada niektóre właściwości korzystniejsze od oleju napędowego, a w szczególności korzystna jest duża ilość tlenu związanego w paliwie (wpływ na proces spalania), jak również posiada bardzo dobre własności smarne. Olej rzepakowy w swojej budowie cząsteczkowej zawiera około 10% tlenu i ma mniej węgla i wodoru od oleju napędowego, dlatego posiada mniejszą od niego wartość opałową [29,30,31,44]. Zasilanie silnika o ZS czystym olejem rzepakowym jest utrudnione z uwagi na odmienne własności fizykochemiczne w stosunku do oleju napędowego, takie jak gęstość, lepkość, napięcie powierzchniowe, temperaturę mętnienia, skład frakcyjny (Rys.1). Olej rzepakowy posiada również wysoką temperaturą zablokowania zimnego filtra ok. 12°C (CFPP – cold fuel plugging point).



Rys. 1. Skład frakcyjny oleju napędowego i rzepakowego (krzywa destylacji oleju rzepakowego i napędowego) [6]

Wysoka lepkość oleju rzepakowego stanowi również źródło problemów w układzie zasilania powodowanych blokowaniem filtra paliwa szczególnie w niskich temperaturach. Problemom tym zapobiec można wprowadzając modyfikację układu paliwowego poprzez zastosowanie systemu podgrzewania oleju rzepakowego obniżającego jego lepkość, która jest silnie skorelowana z temperaturą (Rys.2).



Rys.2. Zależność lepkości kinematycznej OR od temperatury [10]

Stosowanie oleju roślinnego może również prowadzić do trudności eksploatacyjnych ponieważ w składzie posiada on glicerynę, która w wysokich temperaturach może przechodzić w akroleinę (CH₂=CH-CHO). Akroleina w silniku może tworzyć tzw. nagar

(polimery, sadze). W związku z tym aby z oleju roślinnego wyłączyć glicerynę należy przeprowadzić wysokoenergetyczny proces transestryfikacji akroleiny.

Czysty olej roślinny (w postaci handlowej) najczęściej stosowano w starszej generacji pojazdach samochodowych lub ciągnikach rolniczych bez żadnych zmian konstrukcyjnych silnika. Ze względu na niekorzystne własności fizykochemiczne takie paliwo stosowano w pojazdach głównie w miesiącach letnich (wysoka temperatura zewnętrzna). W zakresie zastosowania w silnikach o ZS nieprzetworzonego oleju rzepakowego, do tej pory prowadzono obszerne badania na starszej generacji układów zasilania silników z wtryskiem bezpośrednim [5,6,9,18,19,22,29,30,31,44,47]. Obecnie dużo prac badawczych prowadzonych jest z wykorzystaniem nowoczesnych silników o ZS z zasobnikowym układem wtrysku typu common rail. Interesujące badania przeprowadzili Pietikaainen, Vaaliheikki i inni [40], w których to oceniono emisję cząstek stałych (PM) i tlenków azotu (NO_x) zasilając silnik o ZS czystym olejem rzepakowym. Podczas badań stosowano dodatek AD-BLUE (technologia Selective Catalytic Reduction – SCR). Uzyskane wyniki porównywano do parametrów silnika uzyskiwanych przy zasilaniu olejem napędowym. Wskazano, że liczba cząstek stałych PM była większa, przy zasilaniu silnika OR w stosunku do ON bez udziału SCR. Stwierdzono dla obu paliw redukcję tlenków azotu (NO_x) o 79% z zastosowaniem SCR. Pasyniuk i Golimowski [39] w swoich badaniach oceniali wpływ oleju rzepakowego na parametry pracy silnika wysokoprężnego ciągnika rolniczego John Deere 6830 z wtryskiem bezpośrednim typu common rail. Badany ciągnik rolniczy przez dwa lata pracował w gospodarstwie rolnym (ok. 1000 mth). W tym okresie eksploatacyjnym, wg autorów publikacji, nie wystąpiły żadne usterki, które wskazywałyby na negatywne oddziaływanie oleju roślinnego na silnik, co może świadczyć o dobrym przystosowaniu konstrukcji silnika do tego typu paliwa. Rozruch silnika zarówno w okresie letnim, jak i zimowym, przy ujemnych temperaturach powietrza, nie sprawiał kłopotów. Zmierzone parametry robocze silnika wykazały 15% spadek mocy, maksymalną moc uzyskano 99,3 kW, przy zasilaniu ON natomiast 85,1 kW przy zasilaniu OR (przy obrotach 1700 obr./min). Maksymalny moment obrotowy uzyskano przy obrotach silnika równych 1500 obr./min i było to 597 Nm i 507 Nm odpowiednio dla ON i OR. Z uwagi na spadek mocy przy zasilaniu silnika olejem rzepakowym analogicznie wystąpił wzrost zużycia jednostkowego paliwa o 15% i 19% przy wyższych prędkościach obrotowych. Podobne badania określające poziom emisji składników toksycznych spalin i parametrów roboczych silnika zasilanego czystym olejem rzepakowym zawierają m.in. prace [8,10,13,29,30,31,32,34,43].

Czysty olej roślinny może być samoistnym paliwem do zasilania pojazdów wyposażonych w silnik o ZS, po odpowiednim przystosowaniu konstrukcyjnym silnika oraz jego układu zasilania. Przykładem takiej odmiennej względem tradycyjnych silników konstrukcji silnika jest - silnik Elsbett (dostosowany do napędu nieprzetworzonym olejem roślinnym). Jest to układ charakteryzujący się specjalną konstrukcją tłoka oraz komorą spalania. Posiada również dwuzbiornikowy układ zasilania, wyposażony w podgrzewany zbiornik oleju oraz dodatkowe pompy, podgrzewacze i filtry [6,47].

Zmniejszenie zagrożeń dla pracy silnika (bez zmian konstrukcyjnych silnika) spowodowanych wysoką lepkością oleju rzepakowego można uzyskać stosując dwuzbiornikowy układ zasilania. W takim rozwiązaniu uruchamianie silnika następuje na oleju napędowym, a po osiągnięciu stabilności cieplnej, tj. gdy ciecz chłodząca osiągnie temperaturę około 70°C, następuje przełączenie na zasilanie olejem roślinnym.

Q. Li, Backes i Wachtmeister [41] przeprowadzili badania parametrów roboczych i ekologicznych silnika o ZS typu common rail,

który zasilano olejem rzepakowym (podgrzany do 55°C) i olejem napędowym. Badania prowadzono w zakresie niskiego i średniego obciążenia silnika. Stwierdzono korzystną tendencję spadku CO, HC, NO_x oraz PM (zadymienia) podczas pracy silnika na OR względem ON. Podczas prac zmieniano parametry ciśnienia paliwa oraz kąta początku wtrysku dawki głównej paliwa. Zauważono, że wyższe ciśnienie paliwa mogą poprawiać rozpylanie paliwa w komorze spalania, co powinno prowadzić do intensywniejszego procesu spalania. Stwierdzono, że wcześniejsze występowanie kąta głównego wtrysku paliwa prowadziło do wcześniejszego i bardziej intensywnego przebiegu procesu spalania względem nominalnych ustawień, co miało wpływ na składniki toksyczne spalin. Zbyt wysokie ciśnienie paliwa w szynie oraz niewłaściwy czas wtrysku prowadziły do oddziaływania strugi rozpylonego OR na tłok powodując zwiększenie poziomu sadzy i emisji NO_x. Klimkiewicz, Mruk i inni [15] przeprowadzili badania zasilając czystym olejem rzepakowym silnik ciągnika rolniczego ZEFIR 85 z wtryskiem bezpośrednim. Podali, że czysty olej rzepakowy, jako paliwo do silników ZS, może być stosowany przy wykorzystaniu dwuzbiornikowego układu paliwowego. Układ z podgrzewaniem oleju rzepakowego i automatycznym przełączeniem na paliwo roślinne zapewnia stabilną pracę silnika i zadowalające osiągi. W wyniku badań stwierdzono, że moc nominalna zmniejszyła się o ok. 12%, moment obrotowy zmniejszył się o ok. 9%, godzinowe zużycie paliwa obniżyło się o ok. 7%, a jednostkowe zużycia paliwa wzrosło o ok. 15%, przy zasilaniu silnika olejem rzepakowym względem oleju napędowego. Na podstawie badań empirycznych wykazano, że korzystne jest zwiększanie kąta wyprzedzenia początku wtrysku oleju rzepakowego względem oleju napędowego.

Poprawę własności fizykochemicznych oleju rzepakowego można uzyskać również poprzez zastosowanie różnych dodatków. Z teoretycznego punktu widzenia w wyniku mieszania oleju rzepakowego z dodatkami nigdy nie uzyska się identycznych parametrów jakie posiada olej napędowy. Możliwe byłoby to wówczas gdyby wystąpił efekt synergetyczny w redukcji napięcia powierzchniowego, lepkości i gęstości oleju rzepakowego poprzez dodatek oleju napędowego czy też benzyny. Najczęstszą formą wykorzystania oleju rzepakowego do napędu silników samochodowych są jego mieszaniny z olejem napędowym stosowane w różnych proporcjach (v/v). Badaniami mieszanin oleju rzepakowego z dodatkami zajmowali się między innymi Bocheński i Bocheńska [6] którzy wykazali, że dodatek oleju napędowego, benzyny A1 i etanolu do oleju rzepakowego (w różnych proporcjach v/v), może w dużym stopniu poprawić jego własności fizykochemiczne pozwalające na zastosowanie do silników o zapłonie samoczynnym. Należy jednak podkreślić, że nieduże różnice w napięciu powierzchniowym i gęstości oraz znaczne w lepkości między olejem napędowym i rzepakowym wymagają stosowania znacznych ilości dodatków (co najmniej 30% v/v) aby uzyskać parametry oleju rzepakowego zbliżone do napędowego. Wojdalski, Klimkiewicz i inni [48] zajmowali się badaniem właściwości fizykochemicznych oleju rzepakowego z dodatkiem benzyny lotniczej (Jet A1). Zauważono że przy 30% (v/v) udziale benzyny lepkość kinematyczna zmniejszyła się ponad dwukrotnie, gęstość również uległa zmniejszeniu, a przebieg krzywej destylacji był stosunkowo zbliżony do krzywej dla oleju napędowego. Przeprowadzone pomiary pokazały, że dodatki paliwowe istotnie wpływają na poprawę wybranych własności oleju rzepakowego jako paliwa silnikowego. Niestety w publikacji autorzy nie zamieścili wpływu dodatku benzyny lotniczej do OR na parametry robocze i emisję spalin silnika o ZS, co wydawałoby się bardzo ciekawe. Kruczyński i Orliński [17] badali parametry robocze silnika rolniczego PERKINS 1104C-44 zasilanego różnymi mieszaninami oleju rzepakowego z olejem napędowym. Między innymi podjęto próbę oceny możliwości stoso-

wania mieszaniny oleju rzepakowego z olejem napędowym w stosunku 20%/80% (v/v). Autorzy badań stwierdzili, że po zastosowaniu dodatku ON do OR następował spadek efektywnych wskaźników roboczych silnika (tj. momentu obrotowego i mocy silnika) oraz zwiększenie godzinowe zużycie paliwa (wzrost od 6,6-10,2%) względem ON. Wiązano to głównie z wpływem gęstości i lepkości na proces wtrysku paliwa do cylindra (wielkość kropel paliwa, zasięg strugi), który oddziałuje bezpośrednio na proces spalania. Stwierdzono również w aspekcie ekologicznym większe stężenie dwutlenku węgla w spalinach (CO₂), tlenku węgla (CO) oraz tlenków azotu (NO_x) oraz mniejsze stężenie wodorotlenków (HC). Badaniami mieszanin oleju rzepakowego z olejem napędowym w silniku o ZS z wtryskiem bezpośrednim typu Common Rail zajmowali się również Sam Ki Yoon, Min Soo Kim, Han Joo Kim, Nag Jung Choi,[44]. Badano mieszaninę OR i ON w stosunku 10/90, 20/80 i 30/70 (v/v). W trakcie badań oceniano przebieg procesu spalania i emisji spalin. Zauważono, że wraz ze wzrostem w mieszaninie paliwowej stosunku OR do ON następowało zwiększenie ciśnienia spalania i średniego ciśnienia indykowanego (P_i). Zauważono tendencje zmniejszania tych wartości przy małej prędkości obrotowej silnika 1500 obr/min i wzrastania w zakresie średnich prędkości obrotowych ok. 2500 obr/min. W aspekcie ekologicznym odnotowano zmniejszenie emisji tlenku węgla (CO) i cząstek stałych (PM), oraz nieznaczne zwiększenie emisji tlenku azotu (NO_x). Zauważono, że podczas zwiększania proporcji OR do ON przy prędkości obrotowej silnika 2000 obr i wskaźniku recyrkulacji spalin EGR (procentowy udział spalin) 0%, 10%, 20% i 30%, ciśnienie spalania i średniego ciśnienia indykowanego zmniejszało się. Emisja CO i PM zmniejszyła się, natomiast emisja NO_x zmniejszyła się znacznie (gdy współczynnik recyrkulacji spalin EGR wzrastał). Osipowicz i Stoeck [38] przeprowadzili analizę pracy silnika o zapłonie samoczynnym zasilanym mieszaniną oleju rzepakowego z olejem napędowym oraz samym olejem rzepakowym. Silnik pracujący na paliwach pochodzenia roślinnego charakteryzował się niższą mocą i momentem obrotowym w całym zakresie prędkości obrotowej. Inne badania w tym zakresie również wskazywały tą tendencję [5, 6, 14, 20, 22, 24, 28, 33, 44, 45, 47, 48].

Obecnie na świecie oleje roślinne w tym i olej rzepakowy już na skalę przemysłową poddawane są procesowi estryfikacji tzw. FAME (Fatt Acid Methyl Ester), w wyniku czego otrzymuje się paliwo o własnościach fizykochemicznych zbliżonych do oleju napędowego. Aktualnie w Polsce paliwo FAME jest dodawane do olejów napędowych w ilości do 7% (objętościowo) oraz oferowane jest jako biopaliwo (np. BIO100 firmy Orlen) przeznaczone do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. Stosowanie FAME ma korzystny wpływ na poprawę własności smarnych oraz ograniczenie emisji cząstek stałych PM oraz dwutlenku węgla. Uzyskanie wysokiej jakości estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego (FAME) zależy przede wszystkim od użytego surowca, wstępnego oczyszczenia, oraz zastosowanego pakietu dodatków uszlachetniających, takich jak np. depresatory, antyoksydanty, biocydy. Sayin, Gumus i Canakc [46] badając parametry szybkozmienne doświadczalnego jednocylindrowego silnika o ZS wykazali, że maksymalne ciśnienie w cylindrze, maksymalna szybkość narastania ciśnienia spalania oraz maksymalna szybkość uwalniania ciepła są nieco niższe dla FAME i jej mieszanek z ON w porównaniu do czystego oleju napędowego. Zasilanie silnika FAME i jego mieszaninami z ON powodowało wystąpienie istotnych różnic w czasach wtrysku wpływających na przebieg procesu spalania. Uzyskane różnice wiązano z różnicami we własnościach fizykochemicznych oraz wartości opalowej FAME względem ON. Bocheński i Bocheńska [4,5,6] wykazali w badaniach, że estry metylowe oleju rzepakowego różnią się w pewnym zakresie własnościami fizykochemicznymi w porównaniu z

olejem napędowym. W celu zmniejszenia tych różnic, w eksploatacji zaproponowali stosowanie mieszanin oleju napędowego z estrami oleju rzepakowego. Dodanie 30% estrów oleju rzepakowego nie zmieniło w istotny sposób podstawowych własności mieszanin paliwowych z olejem napędowym. Bambuleac D. [2] poddał analizie przebieg procesu spalania i wtrysku czystego oleju rzepakowego i estru metylowego oleju rzepakowego. Stwierdził, że własności fizykochemiczne tych paliw oddziałują bezpośrednio na przebieg procesów roboczych silnika. W pracy wyniki badań odnoszono do przypadku spalania czystego oleju napędowego. Dla estru metylowego oleju rzepakowego uzyskiwano podobne wskaźniki operacyjne silnika (średnie ciśnienie indykowane, ciśnienie spalania) jak dla oleju napędowego. Wynika to stąd, że własności fizykochemiczne tych paliw są bardzo zbliżone. Ponadto zauważono wpływ lepkości oleju rzepakowego na wzrost ciśnień resztkowych w przewodach wysokiego ciśnienia. Dla czystego oleju rzepakowego stwierdzono małą efektywność procesu spalania w zakresie niskich obciążeń silnika.

Stosowanie w eksploatacji mieszanin oleju napędowego i estrów oleju rzepakowego pozwala na korzystniejszy przebieg procesu spalania, obniżenie toksyczności spalin emitowanych z silnika o zapłonie samoczynnym [4,5,6,27,30,31,33,45]. W publikacji [27] współautor artykułu badał wpływ mieszanin oleju napędowego z estrami metylowymi oleju rzepakowego (FAME w różnych proporcjach) na emisję limitowanych składników spalin: NO_x , CH, CO, a także CO_2 oraz zadymienia spalin. Stwierdzono, że w przypadku badanego silnika o ZS (AD3.152), trudno jest wskazać taki skład mieszaniny FAME i ON, który byłby korzystny ze względu na jednocześnie ograniczenie emisji wszystkich szkodliwych składników spalin. Stwierdzono bowiem, że zależy ona nie tylko od składu mieszaniny FAME– ON, ale także warunków pracy silnika. Zauważono, że większy udział paliwa FAME w mieszaninie z ON wpływa pozytywnie na ograniczenie zadymienia spalin i sprzyja obniżeniu emisji tlenu węgla. Jednak w przypadku emisji niespalonych węglowodorów obserwuje się odwrotną zależność. W innej publikacji [28] stwierdzono, że stosowanie paliwa FAME (w różnych proporcjach) do oleju napędowego powoduje szereg przeciwnych zjawisk w procesie wtrysku paliwa tj. większe opory przepływu, większe opory ruch iglicy rozpylacza, większe opory wypływu paliwa z rozpylacza, mniejsze przecieki paliwa w procesie jego tłoczenia, większe ciśnienia paliwa w chwili otwierania iglicy rozpylacza, gorsze rozpylenie paliwa (większa lepkość), większy zasięg strugi rozpylanego paliwa, wzrost wartości kąta strugi rozpylanego paliwa, większe opory aerodynamiczne wtryskiwanego paliwa oraz krótszy okres opóźnienia samozapłonu dla wysokich temperatur w komorze spalania, mniejszy stopień przyrostu ciśnienia spalania ($dp_c/d\alpha$), mniejszy hałas silnika.

Badania prowadzono również w zakresie stosowania zużytego oleju rzepakowego. Daniszewski [11] badał własności posmażalniczego oleju rzepakowego pod kątem stosowania do zasilania silników spalinowych. W publikacji pokazano koncepcję układu dwustopniowego podgrzewania oleju oraz jego uzdatniania w aspekcie wymagań aparatury paliwowej silnika o ZS. Przeprowadzone dotychczas badania dowiodły, że możliwe jest stosowanie do napędu silników spalinowych posmażalniczego oleju rzepakowego, jednocześnie stwierdzono, że warunkiem koniecznym dla prawidłowej pracy silnika jest wyposażenie go w dwupaliwowy układ zasilania zapewniający rozruch silnika na oleju napędowym oraz dwustopniowe podgrzanie oleju rzepakowego do odpowiedniej temperatury. Stwierdzono zmniejszenie mocy i momentu obrotowego silnika zasilanego olejem posmażalnycznym względem ON, jednocześnie odnotowano, że zadymienie podczas pracy na oleju rzepakowym

utrzymuje się na poziomie zbliżonym do osiąganego na oleju napędowym.

Większość prac koncentrowała się na określaniu parametrów operacyjnych oraz ekologicznych silnika w warunkach ustalonych. Dość obszerne badania prowadzili także autorzy artykułu, którzy zajmowali się badaniem zasilania silnika o ZS paliwem rzepakowym oraz jego mieszanin w stanach nieustalonych (dynamicznych), które odwzorowują rzeczywisty warunki pracy silnika o ZS. W publikacji [26] prowadzono badania, które polegały na indykowaniu silnika wysokoprężnego o zapłonie samoczynnym w stanach nieustalonych, które modelowano poprzez gwałtowne rozpędzanie nieobciążonego silnika. Wykazano, że wraz ze wzrostem zawartości oleju rzepakowego w mieszaninie z olejem napędowym następuje wzrost maksymalnych ciśnień wtrysku o około 5MPa, a dla czystego oleju rzepakowego zmniejszenie ciśnień maksymalnych w cylindrze w stosunku do oleju napędowego. Stwierdzono ponadto, że wraz ze wzrostem udziału oleju rzepakowego w mieszaninie wzrasta kąt trwania wtrysku. Proces spalania paliwa rzepakowego z olejem napędowym w stanach nieustalonych przebiega odmiennie niż spalanie czystego oleju napędowego generalnie ze względu na mniejszą wartość opałową paliwa rzepakowego oraz większą lepkość wpływającą na proces dawkowania i rozpylenia paliwa.

Podsumowując należy stwierdzić, że w wielu ośrodkach naukowych poddawano badaniom wpływ zasilania silnika o zapłonie samoczynnym olejem rzepakowym i jego mieszanin na procesy robocze silnika w warunkach ustalonych jak również nieustalonych (dynamicznych) m.in. [2,5,6,8,9,10,23,30]. Jak już wspomniano bardzo istotnym procesem w silniku o ZS decydującym o efektywności jego pracy, zużyciu paliwa jak również toksyczności spalin jest proces tworzenia mieszaniny palnej. Proces ten obejmuje zarówno przemiany fizyczne (wytworzenie strugi paliwa, jej podgrzanie, odparowanie oraz dyfuzję par), jak i reakcje chemiczne prowadzące do utworzenia związków chemicznych niezbędnych do zaistnienia samozapłonu i procesu spalania. Własności fizykochemiczne oleju rzepakowego w sposób istotny będą oddziaływać na proces rozpylenia paliwa określony parametrami mieszanki palnej i pośrednio będą miały wpływ na przebieg procesu spalania. Dosyć obszernie poddawano analizie parametry tworzenia mieszaniny paliwowo-powietrznej, parametry wtrysku i tworzenia toksycznych składników spalin paliw alternatywnych wykonując szereg czasochłonnych badań stanowiskowych silnika m.in.[16,30,29,27]. Coraz częściej za pomocą programów komputerowych prowadzi się symulację procesu spalania, analizę przebiegu temperatury i ciśnienia w komorze spalania oraz tworzenia się związków toksycznych. Wykorzystanie technik symulacyjnych znacząco ogranicza nakłady związane z badaniami stanowiskowymi silnika oraz w sposób przejrzysty wizualizuje zjawiska zachodzące w komorze spalania silnika. W publikacji [18] autorzy pokazali wyniki obliczeń symulacyjnych wykonanych w programie AVL FIRE, gdzie określano rozkład temperatury i ciśnień w komorze spalania oraz powstawanie związków toksycznych (NO_x i CO) przy spalaniu oleju napędowego i oleju rzepakowego. Obliczenia wykazały, że wyższe wartości temperatury jak i ciśnienia w komorze spalania występowały dla zasilania olejem rzepakowym i mogły być wywołane większą zawartością tlenu w cząsteczce paliwa. Stwierdzono, że wartości stężeń tlenków azotu (NO_x) jak i tlenu węgla (CO) są wyższe dla zasilania silnika olejem rzepakowym względem oleju rzepakowego i wielkości te maleją wraz z wzrostem czasu podawania paliwa. Oczywiście jest fakt, że obliczenia symulacyjne powinny być zweryfikowane poprzez przeprowadzenie wieloparametrycznych badań na stanowisku silnikowym.

PODSUMOWANIE

Jak wynika z przeprowadzonej analizy literatury olej rzepakowy i jego mieszaniny były przedmiotem badań od dłuższego czasu. Obecnie coraz więcej publikacji dotyczy zasilania OR i jego mieszaninami nowoczesnych silników o zapłonie samoczynnym, z układem zasobnikowym typu common rail. Przeprowadzona synteza wiedzy pozwala na stwierdzenie, że olej rzepakowy w czystej postaci (handlowej) jest trudny w zastosowaniu do pojazdów napędzanych silnikami o zapłonie samoczynnym ze względu na swoje własności fizykochemiczne, pomimo tego, że z punktu ekonomicznego nakłady energetyczne na produkcję czystego oleju rzepakowego kończą się praktycznie z chwilą wytłoczenia i przefiltrowania. Z badań własnych autorów oraz danych literaturowych wynika, że stosowanie oleju rzepakowego w każdej formie powodowało zmniejszenie parametrów roboczych silnika (moc, moment obrotowy, średnie ciśnienie indykowane). Jednak na podstawie danych literaturowych nie można jednoznacznie stwierdzić, że zastosowanie jako paliwa oleju rzepakowego przyczyni się do zmniejszenia emisji NO_x, oraz innych związków toksycznych (CO, CO₂, HC i cząstek stałych czyli sadzy), gdyż podawane wyniki znacznie się różnią. Można to wiązać z regulacją konkretnego silnika badawczego. Badania własne autorów artykułu wskazywały na redukcję emisji NO_x podczas zasilania silnika olejem rzepakowym względem oleju napędowego. W odniesieniu do pozostałych składników toksycznych spalin zauważono tendencję odwrotną [16]. Dodatkowo zagrożeniem dla stosowania nieprzetworzonego oleju rzepakowego w pojazdach z silnikami o zapłonie samoczynnym jest odkładanie się nagarów w komorze spalania, co może prowadzić do awarii silnika. Problemem eksploatacyjnym mogą być również zmiany chemiczne paliwa roślinnego powstałe podczas zatrzymania rozgrzanego silnika (wytworzenie się wosków), co może prowadzić do "sklejania" par precyzyjnych w układzie wtrysku paliwa oraz w komorze spalania (np. pierścieni tłokowych). Ograniczeniami technicznymi w zakresie stosowania nieprzetworzonego oleju rzepakowego do zasilania silników o zapłonie samoczynnym, są jego odmienne własności fizykochemiczne w stosunku do oleju napędowego, (tj. gęstość, lepkość, napięcie powierzchniowe, temperaturę mętnienia, skład frakcyjny), co ma decydujący wpływ na przebieg procesu tłoczenia i wtrysku paliwa oraz przebieg spalania. Problemem w zakresie stosowania oleju rzepakowego jako paliwa może być również niejasny stan prawny w Polsce, ze względu na to że wszystkie paliwa płynne obciążone są akcyzą, a więc decydując się na używanie rafinowanego oleju rzepakowego (handlowego) jako paliwo należałoby uiścić stosowne opłaty.

W związku z powyższym można uznać za nieekonomiczne działania dostosowujące konstrukcyjnie silnik o ZS do zasilania olejem rzepakowym. Bardziej rozsądnym działaniem jest dostosowanie oleju rzepakowego do stosowania w silnikach o ZS bez istotnych zmian konstrukcyjnych jednostki napędowej. Można to uczynić na kilka sposobów. Najbardziej efektywnym sposobem jest poddanie OR procesowi estryfikacji. To rozwiązanie, choć wykorzystywane w skali przemysłowej generuje wysokie koszty procesu (proces energochłonny) i niekorzystne produkty uboczne (np. gliceryna). Pośrednim rozwiązaniem jest mieszanie oleju rzepakowego z olejem napędowym. Najbardziej ekonomicznym rozwiązaniem wydaje się być zastosowanie nisko objętościowego dodatku do oleju rzepakowego, który powodowałby zmianę własności fizykochemicznych do wartości zbliżonych do oleju napędowego, przy jednoczesnym niewielkim ubytku parametrów energetycznych silnika. Mimo problemów technicznych oraz formalnoprawnych stosowania oleju rzepakowego jako paliwa, można uznać za uzasadnione rozwijanie technologii użycia oleju rzepakowego w silnikach o zapłonie samo-

czynnym, ze względu na jego proekologiczny wpływ na środowisko oraz korzystny wpływ na rozwój gospodarczy kraju.

BIBLIOGRAFIA

1. Baczewski K., Kałdoński T., *Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym*. Warszawa: WKŁ, 2008.
2. Bambuleac, D., *Dynamical behavior of rapeseed oil and methyl ester of rapeseed oil during high-pressure injection*. EPJ Web of Conferences 25 02002, 2012.
3. Birkavs A., Birzietis G., Dukulis I., *Evaluation of emissions operating diesel engine with rapeseed oil and fossil diesel fuel blends*. Engineering for rural development Jelgava, 24.-25.05.2012.
4. Bocheński C., Oleszczak P., Siwiec S. *Badania procesów rozpylenia oleju napędowego, i estrów metylowych oleju rzepakowego w komorze o stałej objętości*, Journal of Kones International Combustion Engines 2004 vol. 11 No. 1-2.
5. Bocheński C., Bocheńska A., *Badania właściwości mieszaniny oleju napędowego z estrami metylowymi oleju rzepakowego*,
6. Bocheński C., Bocheńska A., *Olej rzepakowy paliwem do silników diesla*. Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 8 133-142, 2008
7. Burnewicz J.: *Innovative Perspective of Transport and Logistics*. Wyd. Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2009
8. Cordos, N., Mariasiu, F., *Hydrocarbon emissions from biofuel based on rapeseed, oil compared to diesel fuel in diesel engine d-2402*. Research Journal of Agricultural Science, 43 (1), 2011.
9. Czechłowski M., Krysztosiak A., Adamski M., Antczak W., *Wpływ stosowania oleju rzepakowego jako paliwa na trwałość aparatury wtryskowej silników zs „Inżynieria Rolnicza”*, 12/2006.
10. Dzienszewski G., *Wybrane problemy stosowania biopaliw do zasilania silników z zapłonem samoczynnym* Inżynieria Rolnicza 10(108)/2008.
11. Dzienszewski G., *Wybrane problemy zasilania silnika diesla zużytym olejem roślinnym*, Inżynieria Rolnicza 9(97)/2007.
12. Hashimoto, M., Dan, T., Asano, I., and Arakawa, T., *Combustion of the Rape-Seed Oil in a Diesel Engine*. SAE Technical Paper 2002-01-0867, 2002.
13. Hemmerlein, N., Korte, V., Richter, H., Schröder, G., *Performance, Exhaust Emissions and Durability of Modern Diesel Engines Running on Rapeseed Oil*. SAE Technical Paper 910848, 1991.
14. Jakóbiec J., Mazanek A., *Czynniki kształtujące ocenę ekologiczną pracy silników samochodowych*, Logistyka 6/2014
15. Klimkiewicz M., Mruk R., Osiak J., Roszkowski H., Słoma J., Wojdalski J., *Efektywność pracy silnika zasilanego olejem rzepakowym*, SGGW Warszawa, 2013
16. Kowalczyk J., Longwic R., Lotko W., Górski K., Łodygowski K., Markov K., *Wstępna analiza toksyczności spalin silnika o zapłonie samoczynnym przy zasilaniu mieszaninami oleju rzepakowego z niereaktywnym rozpuszczalnikiem* Logistyka 3/2015,
17. Kruczyński S., Orliński P., Orliński S., *Wpływ zasilania silnika rolniczego mieszaninami olejów roślinnych z olejem napędowym na wybrane wskaźniki operacyjne jego pracy* Zeszyty naukowe instytutu pojazdów 1(87)/2012.
18. Kruczyński S., Januła J., Kintop M., *Porównawcze obliczenia symulacyjne wybranych parametrów procesu wtrysku paliwa on i or w programie AVL fire*, Zeszyty naukowe instytutu pojazdów 2(88)/2012.
19. Kuszewski H., Jaworski A., Ustrzycki A. *badania smarności wybranych paliw zastępczych stosowanych w transporcie sa-*

- mochodowym, Visnik Nacionalnogo Transportnogo Universitetu ta Transportnoj Akademii Ukraini, t.23, s.118-123, Kijów 2011
20. Labecki, L., Cairns, A., Xia, J., Megaritis, A., Zhao, H., Ganippa, L.C., *Combustion and emission of rapeseed oil blends in diesel engine. Applied Energy* 95 139–146, 2012.
 21. Longwic R., *Charakterystyka działania silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach swobodnego rozpędzania*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2011
 22. Longwic R., Kowalczyk J., Sander P., Lotko W. *Analiza możliwości wykorzystania heksanu w mieszaninie z olejem rzepakowym do zasilania silnika o zapłonie samoczynnym*, Logistyka 3/2014,
 23. Longwic R., Lotko., *Analiza wybranych parametrów procesu spalania silnika wysokoprężnego w warunkach nieustalonych zasilanego olejem rzepakowym*. Teza Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji PAN, Konstrukcja, Badania , Eksploatacja, Technologia Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Zeszyt nr 12, Kraków 1997.,
 24. Longwic R., Sander P., Górski K., Jańczuk B., Zdziennicka A., Szymczyk K., *Nowa koncepcja wykorzystania oleju rzepakowego jako paliwa do zasilania silników o zapłonie samoczynnym*. Technika Transportu Kolejowego 10/2013, Radom 2013
 25. Lotko W., Górski K., *Zasilanie silników wysokoprężnych mieszaninami ON i ETTB*, WNT 2011.
 26. Lotko W., Longwic R., *Nieustalone stany pracy silnika zasilanego paliwem rzepakowym*, Radom 1999.
 27. Lotko W., *Ocena emisji składników spalin silnika wysokoprężnego zasilanego mieszaninami oleju napędowego z estrami metylowymi oleju rzepakowego* ARCHIWUM MOTORYZACJI 4, pp. 403-410 (2006).
 28. Lotko W., *Ocena opóźnienia samozapłonu silnika wysokoprężnego z wtryskiem bezpośrednim zasilanego mieszaninami oleju napędowego z estrami metylowymi oleju rzepakowego*, archiwum motoryzacji 4, pp. 321-337 (2005)
 29. Lotko W., *Studium zastosowań paliw alternatywnych do silników o zapłonie samoczynnym*, Radom 1999.
 30. Lotko W., *Zasilanie silników spalinowych paliwami alternatywnymi*. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 1995.
 31. Lotko W., *Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami węglowodorowymi i roślinnymi*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
 32. Lozano, R., Pechout, M., Vojtisek-Lom, M., *Performance of a diesel engine fueled by rapeseed oil heated to different temperatures*. SAE Technical Paper 2011-24-0107, 2011.
 33. Luft S., *Dwupaliwowy silnik o zapłonie samoczynnym zasilany mieszaniną gazów propan-butan i olejem napędowym*. Radom: Politechnika Radomska, 2002.
 34. Luft S., *Studium silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego alkoholem metylowym*. Radom: Politechnika Radomska, 1997.
 35. Łodygowski K., *"Paliwa syntetyczne do zasilania silników spalinowych z zapłonem samoczynnym"*, TTS Technika Transportu Szybowego, no. 10, 2013.
 36. Nikolic B., Kegl, B., Markovic S., Mitrovic, M., *Determining the speed of sound, density, and bulk modulus of rapeseed oil, biodiesel, and diesel fuel*. Thermal Science Vol. 16, Suppl. 2 pp. S505-S514, 2012
 37. Nishi, K., Korematsu, K., Tanaka, J., *Potential of Rapeseed Oil as Diesel Engine Fuel*. SAE Technical Paper 2004-01-1858. 2004.
 38. Osipowicz T., Stoeck T., *Wpływ oleju rzepakowego jako dodatku do paliwa na emisję substancji toksycznych do atmosfery przez silnik ZS*, Autobusy 6/2014
 39. Pasyniuk P., Golimowski W., *Wpływ oleju rzepakowego na parametry pracy silnika wysokoprężnego ciągnika rolniczego John Deere 6830*, Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering" 2011, Vol. 56
 40. Pietikaainen M., Vaaliheikki A, Oravisjaarvi,K, Kolli T., Huuhtanen M, Niemi S., Virtanen S., Karhu T., Keiski R., *Particle and NOx emissions of a non-road diesel engine with an SCR* Renewable Energy 77 (2015) 377-385.
 41. Q. Li, Backes F., Wachtmeister G., *Application of canola oil operation in a diesel engine with common rail system* Fuel 159 (2015) 141–149.
 42. Raporty i opracowania organizacji międzynarodowych i krajowych dotyczące alternatywnych źródeł energii i pojazdów (lata 2008-2013).
 43. Roy M. M., Wang W., Bujold J., *Biodiesel production and comparison of emissions of a DI diesel engine fueled by biodiesel-diesel and canola oil-diesel blends at high idling operations*. Applied Energy 106 198–208, 2013.
 44. Sam Ki Yoon , Min Soo Kim , Han Joo Kim 2, Nag Jung Choi, *Effects of Canola Oil Biodiesel Fuel Blends on Combustion, Performance, and Emissions Reduction in a Common Rail Diesel Engine*, Energies 2014, 7, 8132-8149.
 45. Saito, A., Nagayasu, S., Tsuboi, Y., Nada, Y., Kidoguchi, Y., *Study on Improvement of Diesel Spray Characteristics Fueled by Rape-seed Oil*. SAE Technical Paper: 2011-32-0561, 2011.
 46. Sayin C., Gumus M, Canakc M., *Effect of fuel injection pressure on the injection, combustion and performance characteristics of a DI diesel engine fueled with canola oil methyl esters-diesel fuel blends* Biomass and bioenergy 46 (2012) 435-446
 47. Szlachta Z.: *Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2002.
 48. Wojdalski J., Klimkiewicz M., Drózd B., Mruk R., Stoma J., *Wybrane właściwości mieszanin oleju rzepakowego z benzyną lotniczą*, SGGW Warszawa 2013.

Current concepts of use of rapeseed oil as fuel

The article was conducted a synthesis of knowledge in the use of rapeseed oil as a fuel. Discussed alternative fuel to power the of compression ignition engines. Indicated current methods of changing the physiochemical properties of rapeseed oil approaching to make the normative parameters of diesel

Autorzy:

Prof. dr hab. inż. **Wincenty Lotko** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Mechaniczny;

dr hab. inż. **Rafał Longwic**, prof. PL – Politechnika Lubelska, Katedra Pojazdów Samochodowych;

dr inż. **Bożena Niemczuk** - Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Szymona Szymonowica w Zamościu;

mgr inż. **Przemysław Sander** - Politechnika Lubelska, Katedra Pojazdów Samochodowych;