

Niezawodność uszczeltek PTFE w instalacjach biopaliwowych – badania i prognozy

Reliability of PTFE gaskets in biofuels installations – tests and predictions

GRZEGORZ ROMANIK, MIECZYŚLAW STRUŚ, PRZEMYSŁAW JASZAK, KORNELIUSZ SIERPOWSKI

DOI 10.36119/15.2023.12.4

Biopaliwa zaliczane są do grona odnawialnych źródeł energii. Produkcja biopaliw do celów wykorzystania w silnikach spalinowych może zapewnić ich rozwój technologiczny oraz mieć wpływ ekonomiczny na sektor OZE i przemysł rolniczy, jednak ich wykorzystanie nadal stanowi istotny problem w eksploatacji tych silników. W artykule zbadano interakcję wybranych biopaliw z uszczelkami. Badane biopaliwa wyprodukowano z surowców odpadowych przemysłu spożywczego – tłuszczów i olejów. W artykule przedstawiono wpływ biopaliw na uszczelki złączy kołnierzowych, podczas badań trwałościowych. Materiał uszczelki (PTFE) został przetestowany zgodnie z normami DIN 28090-3:2014-11 i DIN28091-2. W czasie 1000 godzin badań w temperaturze 353 K mierzono ubytek masy biopaliwa oraz zmianę wydłużenia (naprężenia rozciągającego) śrub kołnierzowych. Określono stopień wycieku paliwa. Po badaniach sprawdzono uszczelkę i nie stwierdzono rozwarstwień. Wartość emisji lotnych biopaliw oraz stopień wycieku paliwa po 1000 godzinach odpowiadały normom DIN. Stwierdzono, że badane materiały uszczelniające mogą mieć kontakt z mieszaniną benzyna – etanol oraz mieszaniną oleju napędowego i estrów metylowych i etylowych.

Słowa kluczowe: biopaliwo, silniki spalinowe, instalacje biopaliwowe, emisja, uszczelka, prognoza trwałości

The biofuels are concerned as one of the Renewable Sources of Energy. Production of biofuels for transportation purposes may provide additional technological development and economical impact on agricultural industry, but their usage is still a vital problem for vehicle exploitation. In this paper an interaction between chosen biofuels and gaskets was researched. Tested biofuels were produced using waste materials from food industry – fats and oils. Biofuels influence on pipes and especially gaskets and its materials during durability tests are shown in this paper. PTFE gasket materials were tested in accordance with DIN 28090-3: 2014-11 and DIN28091-2. During 1000 hours of tests at 353 K, the weight loss of the biofuel and the change in elongation (tensile stress) of the flange bolts were measured. Fuel leakage rate was determined. After tests the gasket was checked and no delamination was observed. The value of volatile biofuels emission and fuel leakage rate after 1000 hours met the DIN standards. It was concluded that researched gasket materials may be allowed for contact with gasoline – ethanol mixture and mixture of diesel and methyl and ethyl esters.

Keywords: biofuel, internal combustion engines, biofuel installations, emission, gasket, life prediction

Akronimy

REE	Estry etylowe rzepaku
FAME	Estry metylowe kwasów tłuszczowych
PTFE	Politetrafluoroetylen
ZI	Silnik z zapłonem iskrowym
ZS	Silnik z zapłonem samoczynnym

Wprowadzenie

Obecnie rozwijane są alternatywne źródła energii odnawialnej, które mają zaspokoić potrzeby sektora transportu i energetyki. Wiele biopaliw, takich jak: biometanol, bioetanol, biobutanol, bioestry, czy-

ste oleje roślinne i inne, można wykorzystać do zasilania tłokowych silników spalinowych w pojazdach oraz silników spalinowych do wytwarzania energii elektrycznej, ciepła i chłodu (kogeneracja i trigeneracja). Część z tych substancji stosowana jest jako dodatek do paliw standardowych, inne można mieszać z wodorem i bezpośrednio zastępować paliwa ropopochodne w silnikach spalinowych. Pewne różnice we właściwościach biopaliw w porównaniu z olejem napędowym lub benzyną wymagają dostosowania układu zasilania paliwem poprzez drobne zmiany konstrukcyjne. Dzięki zajęciu się wrażliwymi punk-

tami, takimi jak materiały uszczelnienia, proponowane modyfikacje pozwalają na zmniejszenie wycieków podczas transportu i magazynowania tych paliw.

Ze względów ekologicznych i ekonomicznych do zasilania silników spalinowych coraz częściej stosuje się biopaliwa. Generalnie dotychczasowe doświadczenia wskazują, że benzynę stosowaną w silnikach o zapłonie iskrowym (ZI) można skutecznie zastąpić równoważną ilością bioetanolu. Silniki o zapłonem samoczynnym (ZS) zasilane olejem napędowym można w podobny sposób zastąpić biodieslem.

dr inż. Grzegorz Romanik <https://orcid.org/0000-0001-8920-2175>, dr hab. inż. Mieczysław Struś prof. uczelni <https://orcid.org/0000-0001-5340-3311>, dr inż. Przemysław Jaszak <https://orcid.org/0000-0003-2724-178X> – Politechnika Wrocławska, Wydział

Mechaniczno-Energetyczny, Katedra Inżynierii Konwersji Energii, Wrocław

mgr inż. Korneliusz Sierpowski <https://orcid.org/0000-0002-8519-9578> – Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Katedra Kriogeniki i Inżynierii Lotniczej. Adres do korespondencji/ Corresponding author: grzegorz.romanik@pwr.edu.pl

Pierwszą generacją dobrze znanych biopaliw jest chemicznie przetworzony olej roślinny otrzymywany z upraw: takich jak: rzepak, soja i słonecznik. Podczas przemysłowej produkcji biodiesla olej roślinny reaguje z toksycznym alkoholem metylowym, dając estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME) i produkt uboczny, glicerynę.

Zastąpienie metanolu etanolem w produkcji biopaliw jest interesującą ideą, ponieważ alkohol etylowy otrzymywany jest z roślin (takich jak zboża czy ziemniaki) w procesach fermentacji i destylacji i nie jest toksyczny. Zarówno FAME, jak i estry etylowe (REE) mogą być stosowane w stanie czystym jako paliwo w odpowiednio przystosowanych silnikach lub mogą stanowić składnik mieszanek paliwowych po zmieszaniu z olejem napędowym i etanolem.

Biopaliwo drugiej generacji otrzymywane jest w wyniku reakcji produktów odpadów (takich jak tłuszcze zwierzęce, olej z produkcji frytek, chipsów i niewykorzystanych części zwierząt) z odwodnionym alkoholem etylowym, w wyniku czego powstaje odnawialny ester etylowy. Ester ten może być stosowany samodzielnie lub jako składnik biodiesla do silników wysokoprężnych.

Bioetanol stosowany jest jako dodatek do benzyny, a także samodzielne paliwo. Do jego zalet należy brak toksycznych produktów spalania oraz zadowalające ciepło spalania na poziomie 30 MJ/kg. Stosowanie czystego etanolu jako paliwa wymaga jednak pewnych zmian w konstrukcji silnika. W porównaniu do benzyny etanol ma niższą wartość opałową i obniżone właściwości smarne, ale posiada wyższą liczbę oktanową i wytwarza czystsze produkty spalania. Wiodącymi producentami etanolu są Brazylia i USA, odpowiadające za 65% światowej produkcji. Obecnie produkty fermentacji alkoholowej zaspokajają 19% zapotrzebowania energetycznego Brazylii.

Estry metylowe kwasów tłuszczowych, czasami nazywane biodieslem, mają właściwości podobne do oleju napędowego. Eksperymenty pokazują, że właściwości użytkowe FAME są porównywalne, a czasami nawet lepsze, niż oleju napędowego. Jednakże pewne niedogodności mogą skutkować nieco większym zużyciem biodiesla w porównaniu do oleju napędowego na bazie ropy naftowej.

Produkcja i transport biopaliw wymagają systemów rurociągów przesyłowych wykorzystujących uszczelki kołnierzone do zaworów, armatury, pomp i zbiorników. Uszczelki narażone na działanie biopaliw poddawane są licznym czynnikom

przyspieszającym degradację [1, 13, 14, 15]. Z opisów literaturowych wynika, że należy przeprowadzić badania wytrzymałościowe materiałów pracujących w środowisku biopaliw, aby zapobiec wyciekom na złączach.

Badania prezentowane w obecnym artykule opierają się na pracy rozpoczętej w [11].

Procedura badań

Testowane biopaliwa

Badano następujące paliwa drugiej generacji:

- estry etylowe wyższych kwasów tłuszczowych – właściwości fizykochemiczne trójgliceroli – głównego składnika olejów roślinnych, uniemożliwiają ich zastosowanie w stanie nieprzetworzonym do zasilania typowych silników ZS [16, 17]. Jedną z najczęściej stosowanych metod uzyskiwania właściwości tłuszczów odpowiadających wymaganiom stawianym olejom napędowym jest reakcja transestryfikacji. Reakcja z odwodnionym alkoholem etylowym w obecności katalizatora zasadowego daje estry etylowe [18].
- bioxdiesel (paliwo trójskładnikowe) – paliwo to składa się z mieszaniny estrów etylowych wytworzonych z odpadowych tłuszczów zwierzęcych i ro-

badane paliwa porównano z olejem napędowym (B7).

Zgodnie z normą DIN 28090-3:2014-1 złącza kołnierzone niewypełnione paliwem potraktowano jako wzorcowe. Wyniki dla tych kołnierzy nie są uwzględnione w prezentowanym artykule.

Testowane uszczelki

Badaniom laboratoryjnym poddano dwie uszczelki PTFE TF590 i 24SH. Uszczelki te są płaskie i wycinane z arkuszy, przy czym TF590 jest wykonany z pierwotnego PTFE z krzemionką, a 24SH składa się z ekspandowanego PTFE bez wzmocnienia. Według producenta ich zadaniem jest uszczelnienie stacjonarnych połączeń kołnierzowych podczas łączenia rurociągów [5]. Z płyt wycięto uszczelki o wymiarach $\varnothing 90 \times \varnothing 50 \times 2$ mm zgodnie z zaleceniami normy [6].

TF590 to strukturalny PTFE wypełniony krzemionką, zaprojektowany do szerokiego zakresu zastosowań. Arkusz jest wytwarzany przy użyciu unikalnego procesu, który zapewnia wysoki poziom fibrylacji, rozwiązując problemy, takie jak relaksacja pełzania i płynięcie na zimno powszechnie związane z normalnymi (gładzonymi lub formowanymi) arkuszami PTFE. Nadaje się do użytku ogólnego, jest odporny na mocne kwasy i roztwory średnio żrące. Ponadto TF590 jest zgodny z przepisami FDA w za-

Tabela 1. Porównanie podstawowych parametrów estrów etylowych REE, Bioxdiesel i B7 olej napędowy [3]

Table 1. Comparison of basic parameters of ethyl esters REE, Bioxdiesel and B7 Diesel [3]

Parametry	Ester etylowy REE	BIOXDIESEL	Olej napędowy B7
Gęstość w 15°C	0.877	0.844	0.845 kg/dm ³
Gęstość w 20°C	0.874	0.839	
Liczba cetanowa	49	50	min. 46
Lepkość kinematyczna	4.53 mm ² /s	2.39 mm ² /s	2-4.50 mm ² /s
Temperatura zapłonu	134.7°C	26°C	>55°C
Temperatura mętnienia	-12.3°C	-23°C	-10°C
Temperatura krzepnięcia	-24.3°C	-37°C	-24°C
Temperatura zablokowania zimnego filtra	-13°C	-33°C	-20°C
Zawartość wody	50.3 mg/kg	97 mg/kg	max. 200 mg/kg
Skład frakcyjny			
do 250°C dest.		42 %V/V	max. 65 %V/V
do 350°C dest.		98 %V/V	min. 85 %V/V
Zawartość siarki	0.01%	<0.01%	<0.01%
Badania korozyjne	1a	1a	1a
Smarność. HFRR	258 μ m	198 μ m	?460 μ m

ślinnych, estrów etylowych oleju rzepakowego REE, oleju napędowego i etanolu [19]. Podstawowe właściwości paliwa BIOXDIESEL i oleju napędowego w odniesieniu do wymagań normy PN-EN 590 przedstawiono w tabeli 1.

stosowaniach spożywczych i farmaceutycznych. Test kompresji na gorąco przeszedł pomyślnie i uzyskał doskonałe wyniki.

Z kolei 24SH to duży arkusz uszczelki wykonany w 100% z czystego, wielokierunkowo ekspandowanego PTFE. Jest

wszechstronny i można go wykorzystać do różnych zastosowań. Arkusz nadaje się do wszystkich typów kołnierzy, jest kompatybilny z prawie wszystkimi mediami i jest zaprojektowany do pracy w szerokim zakresie temperatur. Doskonale sprawdza się w zastosowaniach wymagających wysokich standardów czystości, ponieważ jest z natury czysty i nietoksyczny. Jego właściwości mechaniczne i odporność chemiczna są doskonałe.

Badania laboratoryjne przeprowadzono w oparciu o opracowaną procedurę zgodnie z normą DIN 28090-3:2014-11. Procedura składa się z dwóch etapów. Pierwszy etap obejmuje czynności przygotowawcze i opisuje przebieg procesu podczas wstępnych odczytów dokonywanych po 24 godzinach od umieszczenia w komorze grzewczej. Drugi etap obejmuje czynności powtarzane po 100, 200, 500 i 1000 godzinach.

Uszczelki zostały zmierzone, zważone i umieszczono na testowym złączu kołnierzowym, które pełniło funkcję pojemnika i zostało napełnione 20 ml badanego paliwa (jak pokazano na rys. 1a). Następnie, po nałożeniu drugiego kołnierza, złącze kołnierzowe zabezpieczono za pomocą oznaczonych śrub, aby uzyskać nacisk stykowy na uszczelkę wynoszący 30 MPa (jak pokazano na rys. 1b).

Die. Dodatkowo zbadano napięcie śrub, aby ustalić rzeczywisty nacisk wywierany na uszczelkę. Uszczelki zważono oddzielnie przed i po badaniach.

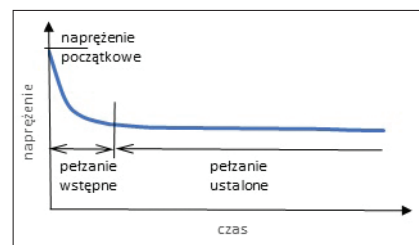
Model relaksacji naprężeń

Analityczny opis procesów reologicznych zachodzących w złączu kołnierzowo-śrubowym, zwłaszcza uszczelnionym miękkimi materiałami, takimi jak PTFE, jest zagadnieniem złożonym ze względu na kilka podstawowych czynników:

- Proces pełzania uszczelki we wszystkich elementach złącza (kołnierze, śruby, nakrętki, podkładki) zachodzi pod wpływem zmiennych warunków naprężenia.
- Relaksacja naprężeń we wszystkich elementach złącza zmniejsza się, gdy uszczelka poddawana jest zmiennym odkształceniom.
- Zachowanie uszczelki wykazuje nieliniową zależność pomiędzy naprężeniem i odkształceniem.
- Materiał uszczelki wykazuje właściwości anizotropowe.
- Występują znaczne różnice w module sprężystości kołnierzy, śrub, nakrętek i uszczelki.

Jednak pomimo tej złożoności, w literaturze dostępnych jest wiele wzorów matematycznych opisujących proces pełzania

można równania podanego w [6]. Model analityczny opisujący relaksację naprężeń uszczelki w połączeniu kołnierzowo-śrubowym przedstawiono w [7]. Uwzględniając podwyższone temperatury kołnierza, zachowanie naprężenia relaksacyjnego w uszczelce można uchwycić za pomocą modelu matematycznego zaproponowanego w [8]. Przykładowe wyniki uzyskane metodą elementów skończonych (MES) przedstawiono w [9] i [10], gdzie wykorzystano prawo potęgowe do zobrazowania właściwości lepkosprężystych uszczelki pracującej w połączeniach kołnierzowo-śrubowych. Zgodnie z tym prawem rozkład naprężeń można podzielić na dwa etapy, jak pokazano na rys. 2.



Rys. 2.

Proces pełzania w funkcji czasu

Fig. 2 The creep process in the function of the time

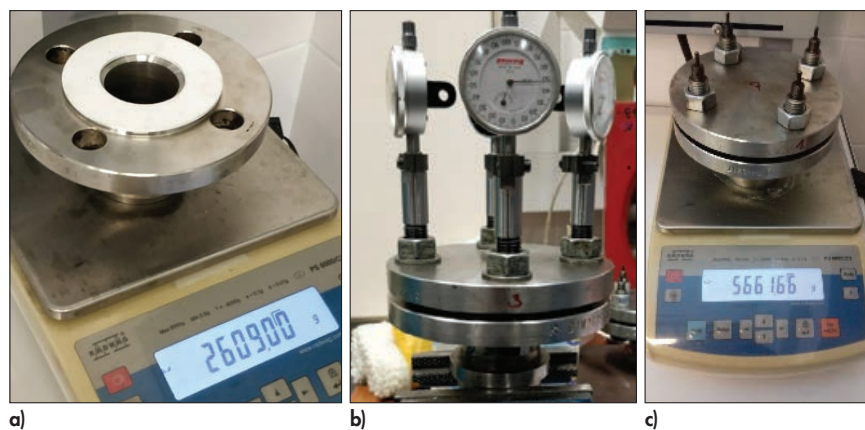
Pierwszy etap nazywany jest pełzaniem wstępnym, charakteryzującym się szybkim spadkiem nacisku kontaktowego na skutek odkształcenia występującego w krótkim czasie. Drugi etap, nazywany pełzaniem wtórnym, to miejsce, w którym odkształcenie rośnie ze stałą szybkością, co stanowi zależność liniową. Jeżeli połączenie kołnierzowe jest ściskane za pomocą wstępnie dokręconych śrub, które później nie są dokręcane w trakcie pracy, nie obserwuje się klasycznego przypadku uszkodzenia uszczelki na skutek przekroczenia dopuszczalnego obciążenia uszczelki, w literaturze anglojęzycznej określanego jako „collapse”.

Odształcenie w drugim etapie można opisać wzorem, w którym stałe B i n są wyznaczane eksperymentalnie.

$$\dot{\epsilon}_{creep} = B\sigma^n \quad (4)$$

Typowa wartość stałej „n” jest często większa niż 1, przy czym zwykle górna granica wynosi około 8. Wyższa wartość „n” oznacza mniejszy efekt pełzania.

Aby zasymulować docisk uszczelki (relaksację naprężeń), autorzy przyjęli pewne założenia dotyczące badanych połączeń kołnierzowych. W pierwszym założeniu uznano, że śruby, nakrętki i kołnierze są bardzo sztywne, przez co efekt relaksacji jest pomijalny. W drugim założeniu ustalono, że uszczelka jest materiałem liniowym



Rys. 1.

Złącze kołnierzowe na poszczególnych etapach czynności montażowych zgodnie z procedurą: a) zważenie kołnierza wypełnionego paliwem, b) proces dokręcania śrub, c) zważenie kompletnego złącza kołnierzowego [7]

Figure 1. Pictures of the operation during the test according to the procedure: a) weigh of the flange filled with a fuel, b) the process of bolts tightening, c) weigh of the complete flange joint [7]

Po wyjęciu czujników zegarowych zmontowane złącze kołnierzowe zważono (jak pokazano na rys. 1c) i umieszczono w komorze grzewczej, w której nastawiono temperaturę 80°C. Proces nagrzewania trwał 1000 godzin. W określonych odstępach czasu – mianowicie co 24, 100, 200 i 500 godzin – kołnierze wyjmowano z komory w celu ważenia. Pozwoliło to na określenie ubytku masy paliwa w cza-

i relaksacji w połączeniach kołnierzowych śrubowych z miękkimi uszczelkami. Zależną od czasu relaksację naprężeń miękkiej uszczelki PTFE można opisać za pomocą modelu relaksacji Burgera, zaproponowanego w [5]. Dokładne modelowanie relaksacji pełzania materiałów wykazujących nieliniowe zachowanie lepkosprężyste w podwyższonych temperaturach i zmiennym odkształceniu można uzyskać za po-

o stałym module sprężystości. W trzecim, krytycznym założeniu ustalono, że szybkość odkształcania wpływa wyłącznie na materiał uszczelki, powodując spadek nacisku kontaktowego.

Bazując na powyższych założeniach całkowite odkształcenie uszczelki można zapisać jako:

$$\varepsilon_{\text{tot}} = \varepsilon_{\text{elast}} + \varepsilon_{\text{creep}} \quad (5)$$

Zakładając, że relaksacja naprężeń uszczelki następuje przy stałym odkształceniu, zatem po wyprowadzeniu równania (5) można je zapisać jako:

$$0 = \dot{\varepsilon}_{\text{elast}} + \dot{\varepsilon}_{\text{creep}} \quad (6)$$

Biorąc do wzoru (6) odkształcenie sprężyste jako:

$$\dot{\varepsilon}_{\text{elast}} = \frac{\dot{\sigma}}{E} \quad (7)$$

i równanie (4), wówczas naprężenie zależne od czasu można zapisać jako:

$$0 = \frac{\dot{\sigma}}{E} + B\sigma^n = \frac{d\sigma}{dtE} + B\sigma^n \quad (8)$$

Rozwiązując równanie (8) w czasie, ostatecznie możemy otrzymać wzór w postaci:

$$t = \frac{1}{(n-1)BE} \left(\frac{1}{\sigma^{n-1}} - \frac{1}{\sigma_{\text{pre}}^{n-1}} \right) \quad (9)$$

Rozwiązanie równania (9) w celu uzyskania naprężenia w zależności od czasu w warunkach naprężenia wstępnego:

$$\sigma = \frac{\sigma_{\text{pre}}}{(\#_0 + 1)^{\frac{1}{n-1}}} \quad (10)$$

gdzie:

$$t_0 = (n-1)BE\sigma_{\text{pre}}^{n-1} \quad (11)$$

Przedstawione podejście do zagadnienia pełzania pozwala uzyskać proces modelowy, który można w kolejnych etapach porównywać z parametrami eksperymentalnymi.

Wskaźnik wycieku

Ubytek masy paliwa w trakcie badania umożliwia określenie intensywności wycieku przez uszczelkę. Zewnętrzna średnica uszczelki wynosi $\varnothing 90$ mm, a wewnętrzna $\varnothing 50$ mm. Średnią średnicę uszczelki można obliczyć ze wzoru:

$$\begin{aligned} \varnothing_{\text{mean}} &= \frac{\varnothing_{\text{outer}} + \varnothing_{\text{inner}}}{2} \\ &= \frac{90\text{mm} + 50\text{mm}}{2} = 70\text{mm} \end{aligned} \quad (12)$$

Zatem średnia długość uszczelki wynosi:

$$\begin{aligned} l &= \varnothing_{\text{mean}} \pi = 70\text{mm} \cdot \pi = \\ &= 219.9\text{mm} = 0.22\text{m} \end{aligned} \quad (13)$$

Wskaźnik wycieku oblicza się ze wzoru:

$$\lambda = \frac{1}{l} \frac{dm}{dt} \quad (14)$$

gdzie:

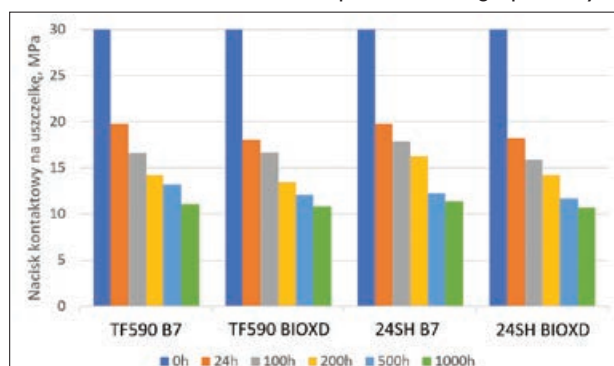
λ – wskaźnik wycieku, mg/m·s
 dm – ubytek masy biopaliwa, mg
 l – średnia długość uszczelki, m
 dt – czas badania, s

Informacje uzyskane z obliczeń współczynnika wycieku dają możliwość połączenia go z naciskiem stykowym kołnierzy na uszczelkę. Uzyskanie takich zależności jest istotne z punktu widzenia analitycznego podejścia do zagadnienia wycieków ze złącza kołnierzowego.

Wyniki badań

Uszczelki TF590 i 24SH zostały poddane testom w celu oceny ich odporności na dwa rodzaje paliw. Wyniki obejmowały zmiany docisku uszczelki oraz zmiany masy badanego złącza kołnierzowego. Podczas testów zaobserwowano, że niektóre fragmenty uszczelki uległy zawilgoceniu paliwem. Ponadto zmierzono masę każdej uszczelki zarówno przed, jak i po badaniach.

Rys. 3. Wykres zbiorczy przedstawiający spadki naprężeń w poszczególnych kołnierzach
 Fig. 3. Summary chart showing stress drops in individual flanges



W odstępach 24, 100, 200, 500 i 1000 godzin podczas badania wskaźniki sondy mocowano do skalibrowanych śrub, a następnie zerowano. Procedura polegała na szybkim odkręceniu nakrętki, zarejestrowaniu wartości wydłużenia śruby, a następnie ponownym dokręceniu nakrętki w celu wyzerowania wskaźnika sondy. Zmiana długości kalibrowanej śruby odpowiadała jej odkształceniu. Pomiaru te umożliwiły określenie nacisku kontaktowego na powierzchnie uszczelniające w określonych odstępach czasu. Wyniki wskazujące spadek docisku dla uszczelki TF590 i 24SH przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Spadek nacisku kontaktowego uszczelki podczas 1000 godzin testu w środowisku B7 i Bioxdiesel

Table 2. Contact pressure drop of gaskets during 1000 hours tests in B7 and Bioxdiesel environment

czas, h	TF590		24SH	
	B7, MPa	BIOXD, MPa	B7, MPa	BIOXD, MPa
0	30	30	30	30
24	19.8	18.1	19.8	18.2
100	16.6	16.7	17.9	15.9
200	14.2	13.5	16.3	14.2
500	13.2	12.1	12.2	11.7
1000	11.1	10.8	11.4	10.7

Dla wzorcowego złącza kołnierzowego nacisk kontaktowy dla TF590 po 1000 godzinach wyniósł 11.5 MPa, a dla 24SH 11.9 MPa.

Naczynia wypełnione olejami ważono w przerwach. Wyniki zmian masy paliwa podczas badań przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Ubytek masy paliwa podczas testu
 Table 3. Fuel weight loss during the tests

czas, h	TF590		24SH	
	B7, g	BIOXD, g	B7, g	BIOXD, g
0	0	0	0	0
24	0.07	0.06	0.08	0.05
100	0.13	0.15	0.08	0.12
200	0.22	0.28	0.11	0.15
500	0.28	0.31	0.15	0.20
1000	0.33	0.35	0.22	0.28

Na rys. 3 przedstawiono zbiorczy wykres spadku nacisku kontaktowego na uszczelkach TF590 i 24SH w badanych środowiskach paliw.

Nacisk kontaktowy na uszczelki gwałtownie zmniejsza się w ciągu pierwszych

24 godzin badania, spadając o około 11–12 MPa zarówno w przypadku TF590, jak i 24SH. Tę redukcję wartości nacisku można przypisać pełzaniu uszczelki, zjawisku obserwowanemu w przypadku wszystkich materiałów uszczelki.

Po 100 godzinach testu nacisk kontaktowy na uszczelki dalej spada, osiągając 16.6 MPa dla TF590 i około 18–16 MPa dla 24SH. Nawet po 1000 godzinach testów nacisk kontaktowy dla wszystkich paliw utrzymuje się na poziomie powyżej 10.7 MPa.

Przeprowadzone badania umożliwiają ocenę wpływu nacisku kontaktowego na

szczelność uszczelki. Warto zaznaczyć, że wyciek jest ściśle powiązany z naciskiem wywieranym na uszczelkę, o czym już wspomniano wcześniej.

Wartości wskaźnika wycieku przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wskaźnik wycieku uszczelki podczas 1000-godzinnych testów w środowisku B7 i Biodiesel

Table 4. Leakage rate of gaskets during 1000 hours tests in B7 and Biodiesel environment

	Wskaźnik wycieku $\lambda_{2,0,m,g}$	
	TF590	24SH
B7	4.16×10^{-5}	2.8×10^{-5}
BIOXDIESEL	4.4×10^{-5}	3.5×10^{-5}

Zaobserwowano, że szybkość wycieku zależy od nacisku wywieranego na uszczelkę. W przypadku materiału 24SH i środowiska biopaliwa można zaobserwować wyższy nacisk kontaktowy w porównaniu do TF590, co skutkuje zmniejszeniem wycieków.

Wyciek biopaliwa przez uszczelkę TF590 jest bardziej wyraźny niż przez 24SH, nawet przy zachowaniu podobnych wartości nacisku końcowego.

Na rysunkach 4 i 5 zestawiono wyniki naprężeń kontaktowych uszczelki w czasie, wraz z wynikami uzyskanymi ze wzoru (10). Parametry „n” i „B” wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów.

Wartość „t0” oznacza punkt, w którym naprężenie zmniejsza się ze stałą szybkością. Dla złącza uszczelnionego materiałem TF590 obliczono czas „t0” dla stałej szybkości redukcji naprężeń kontaktowych wynoszący 428 godzin dla paliwa B7 i 387 godzin dla paliwa BIOXD. Zaważalną rozbieżność pomiędzy wynikami modelu i eksperymentalnymi zaobserwowano w obszarze, w którym czas był mniejszy niż „t0”. Natomiast w obszarze czasowym przekraczającym „t0” model matematyczny i wyniki eksperymentów wykazały dobrą zgodność.

W przypadku złącza uszczelnionego materiałem 24SH czas zaniku naprężeń stałych obliczono na 470 godzin dla paliwa B7 i 421 godzin dla paliwa BIOXD. W przypadku obu typów materiałów uszczelki, „t0” okazało się najdłuższe pod wpływem paliwa B7, a najkrótsze w przypadku paliwa BIOXD. Tendencje te sugerują, że paliwo BIOXD przyspiesza początkową redukcję naprężeń wstępujących w materiałach uszczelki w pierwszym niekontrolowanym przedziale czasu.

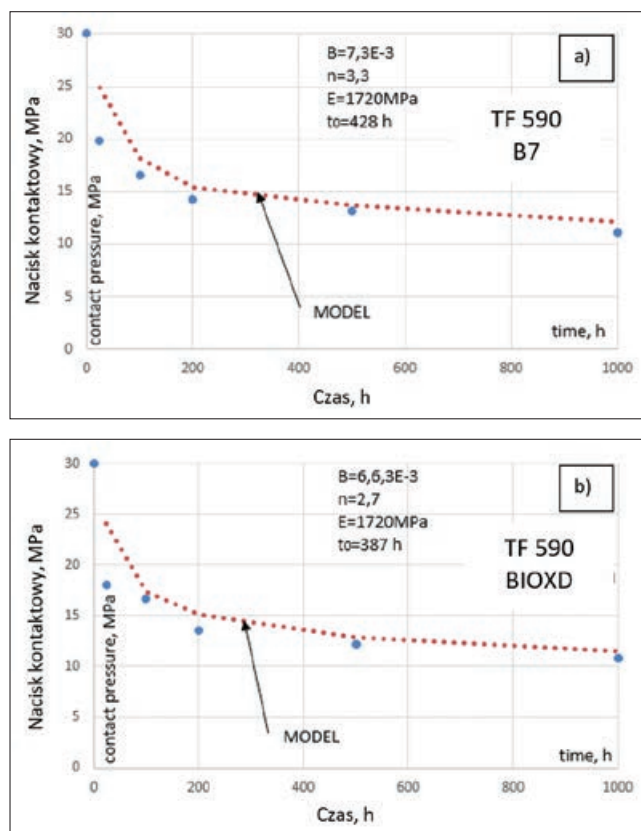
Podsumowanie

Przeprowadzone eksperymenty prowadzą do następujących wniosków:

- Badanie uszczelki pracujących w środowisku biopaliw nie wykazało roz-

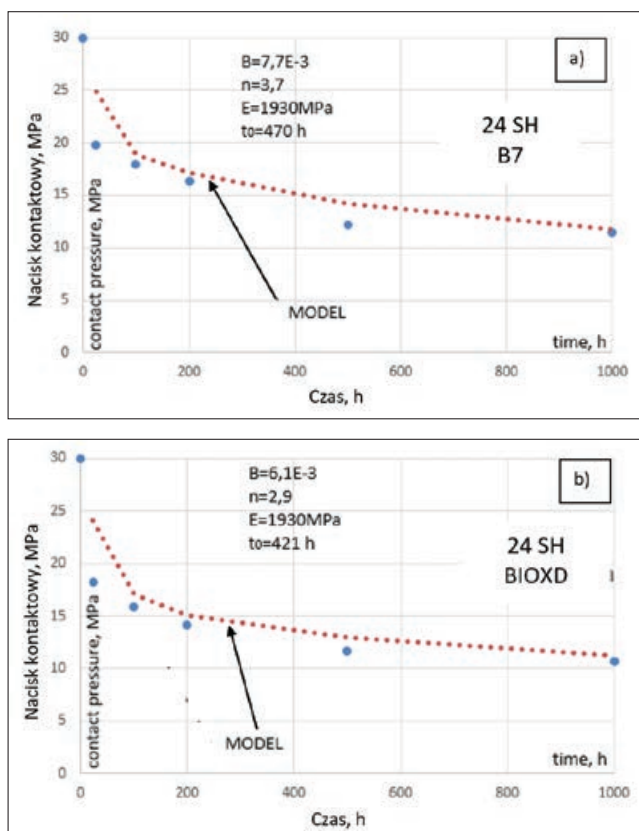
warstwień ani wybrzuszeń na ich powierzchni. Rozszerzone testy wykazały, że długotrwałe narażenie na biopaliwa nie spowodowało żadnych uszkodzeń uszczelki.

- Zmierzony ubytek paliwa dla obu badanych typów uszczelki po 1000 godzinach testów nie przekroczył 1 grama. Jest to znacznie poniżej dopuszczalnej utraty paliwa wynoszącej 2 g określonej w normie DIN 28090-3:2014-11.
- Stopień wycieku zarówno przez uszczelki TF590, jak i 24SH utrzymuje się w dopuszczalnych granicach, nie przekraczając 0,1 mg / (m x s). Wyniki te, zgodnie z zaleceniami normy DIN 28091-2, wskazują na przydatność tych uszczelki do stosowania w instalacjach biopaliwowych.
- Nacisk kontaktowy na miękki materiał uszczelki wraz z jego zmianami w czasie badania ułatwia analizę naprężeń i utworzenie modelu relaksacji naprężeń. Minimalne pełzanie obserwowane dla wszystkich materiałów uszczelki potwierdza ich przydatność do stosowania w instalacjach paliwowych.
- Różne normy UE regulują badania uszczelki. Stosując się do procedur testowych określonych w normie DIN 28090-3:2014-11, możemy zaproponować podejście probabilistyczne



Rys. 4. Relaksacja naprężeń kontaktowych uszczelki TF590 pracującej w połączeniu kołnierzym poddanym działaniu temperatury 80°C: a) złącze z paliwem B7, b) złącze z paliwem BIOXD

Fig. 4. Contact stress relaxation of the gasket TF590 operating in flange bolted joint subjected to temperature 80°C: a) joint with B7, b) joint with BIOXD



Rys. 5. Relaksacja naprężeń kontaktowych uszczelki 24SH pracującej w połączeniu kołnierzym poddanym działaniu temperatury 80°C: a) złącze z paliwem B7, b) złącze z paliwem BIOXD

Fig. 5. Contact stress relaxation of the gasket 24SH operating in flange bolted joint subjected to temperature 80°C: a) joint with B7, b) joint with BIOXD

wykorzystujące sprawdzone modele do przewidywania niezawodności zastosowanych uszczelnień.

LITERATURA

- [1] Struś M, Rewolte M, Rogula J, Trawiński G, „Efficiency of diesel engine fuelled with biofuels of second generation BIOXDIESEL,” *Journal of KONES Powertrain and Transport*, tom 22, nr 4, 2015.
- [2] PN-EN 1514 – 1:2001 – Flanges and their joints. Dimensions of gaskets for PN-designated flanges. Non-metalic flat gaskets with or without inserts.
- [3] DIN 28090-3:2014-11 – Static gaskets for flange connections – Gaskets made from sheets – Part 3: Chemical resistance test procedures
- [4] DIN 28091-2 – Technical delivery conditions for gasket sheets – Part 2: Fibre-based gasket materials (FA); requirements and testing
- [5] Bharadwaj M, Claramunt S, Srinivasan S, “Modeling Creep Relaxation of Polytetrafluorethylene Gaskets for Finite Element Analysis, *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, Vol. 5, No. 2, May 2017
- [6] Sorvari J, Malinen M, “Determination of the relaxation modulus of a linearly viscoelastic material”, *Mech. Time-Depend. Mater.* (2006), 10, 125-133
- [7] Wasmi H. R, Abdullah M, Jassim Q, “Development of Model for Creep Relaxation of Soft Gaskets in Bolted Joints at Room Temperature”, *International Journal of Current Engineering and Technology*, 28 July 2016, Vol.6, No.4 (Aug 2016)
- [8] Bouzid H. A, Nechache A, “An Analytical Solution for Evaluating Gasket Stress Change in Bolted Flange Connections Subjected to High Temperature Loading”, November 2005, *Journal of Pressure Vessel Technology* 127(4)
- [9] Abid M, Iqbal S, Khushnood S, “Nonlinear Finite Element Analysis of Gasketed Flange Joints under Combined Internal Pressure and Different Thermal Loading Conditions”, *Failure of Engineering Materials and Structures* October 2007.
- [10] Guruchannabasavaiah N. G, Arun L. R, “Effect of Temperature and associated deformations on the gasket seal compression in a pressure vessel”, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 4, Issue 8, August-2013
- [11] Rogula J, “Durability tests of gaskets in biofuel environment”, *SAE Technical Papers*, 2020, No. 1, s.30-33
- [12] Mączyńska J, Krzywonos M, Kupczyk A, Tucki K, Sikora M, Pińkowska H, Bączyk A, Wielewska I. “Production and use of biofuels for transport in Poland and Brazil – The case of bioethanol”, *Fuel*, Vol. 241, 2019, p. 989-996, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.12.116>
- [13] Sharma K, Castello D, Haider M S, Pedersen T H, Rosendahl L A, “Continuous co-processing of HTL bio-oil with renewable feed for drop-in biofuels production for sustainable refinery processes”, *Fuel*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121579>
- [14] Xiaomei Lei, Xiangze Du, Hui Xin, Xiaoqin Chen, Huiru Yang, Linyuan Zhou, Yan Zeng, Hualong Zhang, Yunfei Tian, Dan Li, Changwei Hu, “Chemical-switching strategy for the production of green biofuel on NiCo/ MCM-41 catalysts by tuning atmosphere”, *Fuel* 315, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123118>
- [15] Malins K, Kampars V, Kampare R, Prilucka J, Brinks J, Murnieks R, Apse-niece L, “Properties of rapeseed oil fatty acid alkyl esters derived from different alcohols”, *Fuel* 137, 2014, p. 28-35, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.07.091>
- [16] Cahyo N, Sitanggang R, Simareme A, Paryanto P, “Impact of crude palm oil on engine performance, emission product, deposit formation, and lubricating oil degradation of low-speed diesel engine: An experimental study”, *Results in Engineering* 18, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101156>
- [17] Hazar H, Sevinc H, “Investigation of exhaust emissions and performance of a diesel engine fueled with preheated raw grape seed oil/propa-nol blends”, *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification* 188 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109378>
- [18] Yusoff M.F.M, Xu X, Guo Z, “Comparison of Fatty Acid Methyl and Ethyl Esters as Biodiesel Base Stock: a Review on Processing and Production Requirements”, *J Am Oil Chem Soc* (2014) 91:525–531, DOI 10.1007/s11746-014-2443-0
- [19] Chen W, Suzuki T, Lackner M, “Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation”, Second Edition, Springer International Publishing Switzerland 2017, ISBN 978-3-319-14410-8, DOI 10.1007/978-3-319-14409-2

Podziękowania

Autorzy pragną złożyć podziękowania firmie LeaderTech za wycięcie i dostarczenie próbek do badań.