

Leszek Chybowski<sup>(a)</sup>, Marcin Szczepanek<sup>(a)</sup>, Piotr Brożek<sup>(a)</sup>, Tomasz Pusty<sup>(a)</sup>, Robert Pełech<sup>(b)</sup>, Iwona Michalska-Požoga<sup>(c)</sup>  
 (a) Politechnika Morska w Szczecinie; (b) Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie; (c) Politechnika Koszalińska

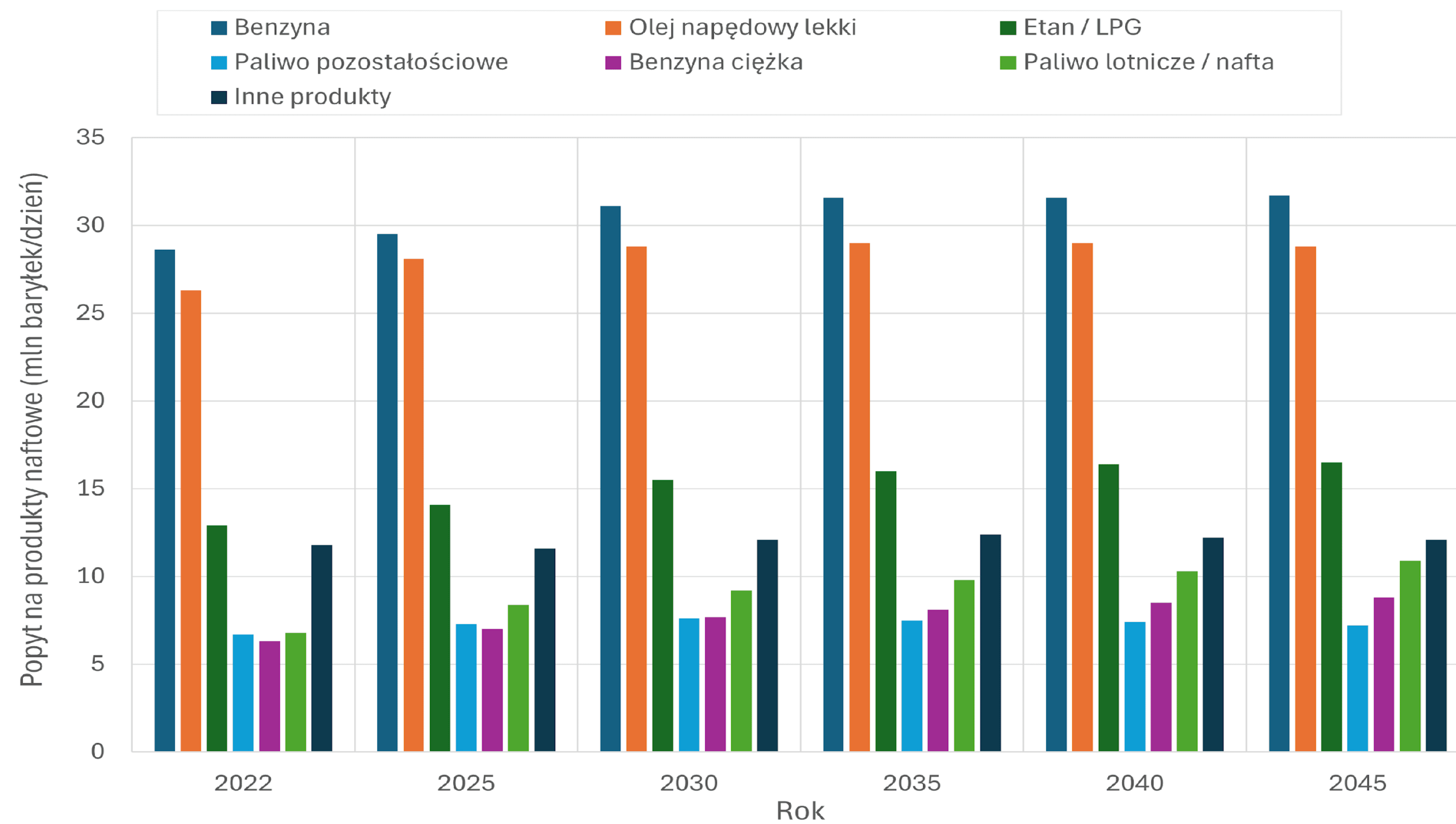
## 1. WSTĘP

Kryzys energetyczny oraz degradacja środowiska należą do kluczowych wyzwań XXI wieku. Dynamiczny wzrost populacji, urbanizacja i industrializacja powodują stałe zwiększanie zapotrzebowania na energię i surowce. Liczba ludności świata przekroczyła w 2023 roku 8 miliardów, a prognozy ONZ przewidują wzrost do 9,7 miliarda w 2050 r., co przełoży się na około 25–30% większe zapotrzebowanie na energię względem 2020 r. [1,2].

Mimo postulatów dekarbonizacji globalna gospodarka pozostaje silnie uzależniona od paliw kopalnych, które dostarczają ok. 88% energii pierwotnej. Udział OZE nadal nie przekracza 12%. Transport drogowy i morski pozostają w ponad 95% zależne od paliw ropopochodnych [3,4].

Taka struktura zużycia energii skutkuje bardzo wysoką emisją gazów cieplarnianych. W 2023 r. emisja CO<sub>2</sub> z produkcji energii wyniosła ponad 37,4 mld ton, z czego ok. 75% pochodziło ze spalania paliw kopalnych. Przyczynia się to do intensyfikacji zmian klimatycznych, w tym wzrostu temperatury, topnienia lodowców i podnoszenia poziomu mórz [5].

Pomimo rozwoju sektora OZE, prognozy wskazują, że zapotrzebowanie na paliwa ciekłe, w tym olej napędowy, będzie nadal rosło. Według „World Energy Outlook 2023” IEA, w latach 2022–2035 popyt na paliwa destylacyjne w transporcie wzrośnie o ok. 3 mln barytek dziennie, czyli ponad 10% w stosunku do poziomu z 2022 r. Wzrost ten wynika głównie z rozwoju transportu towarowego w Azji i Afryce, gdzie modernizacja floty i infrastruktury paliw alternatywnych przebiega wolniej [6].



Rysunek 1. Prognozowane zapotrzebowanie na paliwa ropopochodne w latach 2022-2045 [6]

Transport morski jest odpowiedzialny za ponad 80% globalnego handlu, zużywa rocznie ok. 300 mln ton paliw ropopochodnych. Mimo wprowadzenia regulacji IMO (MARPOL Annex VI, Sulphur Cap 2020, CII, EEXI), emisje CO<sub>2</sub> z żeglugi pozostają wysokie i przekraczają 900 mln ton rocznie [6,7].

## 2. BADANIA

Przeprowadzono kompleksowe badania właściwości fizykochemicznych i eksploatacyjnych mieszanin oleju napędowego (ON) z dodatkiem oleju pirolitycznego (RF) uzyskanego z recyklingu zużytych opon samochodowych. Celem pracy było określenie wpływu udziału oleju pirolitycznego w mieszaninie na podstawowe parametry jakościowe, energetyczne oraz tribologiczne paliwa, a także na jego przydatność do zasilania silników o zapłonie samoczynnym.

W ramach badań przeprowadzono szczegółową analizę reologiczną, energetyczną i zapłonową mieszanin ON + RF o zawartości oleju pirolitycznego w zakresie od 5% do 20% wag., a także pomiary właściwości tribologicznych, zawartości siarki, wody, osadów, pozostałości po koksowaniu i spoieleniu.

Parameter	Unit	Mieszanina RF z DO				
Udział masowy RF w mieszaninie C <sub>RF</sub>	% wag.	5	7	10	15	20
Masa DO m <sub>DO</sub>	g	190	186	180	170	160
Masa RF m <sub>RF</sub>	g	10	14	20	30	40
Niepewność standardowa typu B wyznaczonej masy u <sub>m</sub>	g	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023
niepewność standardowa typu B udziału masowego RF w mieszaninie z DO u <sub>B</sub> (C <sub>RF</sub> )	% wag.	0,0019	0,0010	0,0005	0,0002	0,0001

Tabela 1. Parametry badanych mieszanin paliwowych wraz z niepewnościami standardowymi wyznaczenia masy i udziału oleju pirolitycznego (RF) w mieszaninie

## 3. WYNIKI

Badania wykazały, że olej pirolityczny charakteryzuje się wyższą gęstością (931,9 kg/m<sup>3</sup>) i lepkością kinematyczną (5,10 mm<sup>2</sup>/s w 40°C) oraz niższą temperaturą zapłonu (38°C) w porównaniu z olejem napędowym (836,4 kg/m<sup>3</sup>; 2,73 mm<sup>2</sup>/s; 64°C).

Wrzaz ze wzrostem udziału RF w mieszaninie obserwowano:

- wzrost gęstości i lepkości,
- poprawę smarności paliwa (spadek WS<sub>1.4</sub> z 327 μm do ok. 250 μm),
- obniżenie temperatury zapłonu i wartości opałowej (z 45,5 MJ/kg do ok. 43 MJ/kg),
- wzrost zawartości siarki (z 0,000% do 0,822% wag.) i pozostałości po koksowaniu.

Otrzymane wyniki wskazują, że olej pirolityczny z recyklingu opon może być bezpiecznie stosowany jako komponent mieszanin paliwowych do 10–15% wag., spełniających kluczowe wymagania norm PN-EN 590:2022-08 oraz ISO 8217:2024. Stosowanie takich mieszanin sprzyja realizacji założeń gospodarki o obiegu zamkniętym (Circular Economy) i ograniczeniu wykorzystania paliw kopalnych w sektorze transportowym.

Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do opracowania standardów jakościowych i technologicznych dla niskoemisyjnych paliw porecyklingowych, które mogą znaleźć zastosowanie w silnikach wysokoprężnych w transporcie lądowym i morskim.

Wymagania	ISO 8217:2024						
Zawartość oleju RF w mieszaninie z DO C <sub>RF</sub> (% wag.)	0	5	7	10	15	20	100
Zawartość siarki C <sub>S</sub>	+	+	+	+	+	+	+
Zawartość wody C <sub>w</sub>	+	+	+	+	+	+	+
Smarność WS <sub>1.4</sub>	+	+	+	+	+	+	+
Pozostałość po spoieleniu X <sub>A</sub>	–	–	–	–	–	–	–
Pozostałość po koksowaniu z 10% obj. pozostałości po destylacji X <sub>CR</sub>	+	+	+	+	+	+	–
Osad całkowity przy filtracji na gorąco X <sub>S</sub>	+	+	+	+	+	+	+
Wymagania	Ministra Klimatu i Środowiska						
Zawartość RF w mieszaninie z DO C <sub>RF</sub> (% wag.)	0	5	7	10	15	20	100
Zawartość siarki C <sub>S</sub>	–	–	–	–	–	–	–
Zawartość wody C <sub>w</sub>	+	+	+	+	+	+	+
Smarność WS <sub>1.4</sub>	+	+	+	+	+	+	+
Pozostałość po spoieleniu X <sub>A</sub>	–	–	–	–	–	–	–
Pozostałość po koksowaniu z 10% obj. pozostałości po destylacji X <sub>CR</sub>	+	+	+	+	+	+	–
Zanieczyszczenia mechaniczne X <sub>C</sub>	+	–	–	–	–	–	–
Wymagania	MARPOL, Annex VI						
Zawartość RF w badanym blendzie C <sub>RF</sub> (% wag.)	0	5	7	10	15	20	100
Zawartość siarki C <sub>S</sub> (w obrębie stref SECA)	+	+	+	+	–	–	–
Zawartość siarki C <sub>S</sub> (poza obrębem stref SECA)	+	+	+	+	+	+	–
Zawartość siarki CS (silnik z systemem deSO <sub>x</sub> )	+	+	+	+	+	+	+

Tabela 2. Zbiorcze zestawienie spełnienia przez badane paliwa wymagań granicznych wskazanych w wybranych dokumentach (W tabeli symbolem plus (+) oznaczono spełnienie przez dane paliwo wymagań co do wartości określonego parametru w dopuszczalnych granicach, natomiast symbolem minus (–) wskazano parametry, które są poza wartościami dopuszczalnymi)

- [1] Miranda M, Cabrita I, Pinto F, Gulyurtlu I. Mixtures of rubber tyre and plastic wastes pyrolysis: A kinetic study. Energy 2013;58:270–82.
- [2] Honus S, Juchelkova D, Campen A, Wiltowski T. Gaseous components from pyrolysis—Characteristics, production and potential for energy utilization. J Anal Appl Pyrolysis 2014;106:1–8.
- [3] Chen Y, Wong CWY, Yang R, Miao X. Optimal structure adjustment strategy, emission reduction potential and utilization efficiency of fossil energies in China. Energy 2021;237:121623.
- [4] Yao S, Li T, Li Y. Promoting sustainable fossil fuels resources in BRICS countries: Evaluating green policies and driving renewable energy development. Resources Policy 2023;85:103990.
- [5] Kibria A, Akhundjanov SB, Oladi R. Fossil fuel share in the energy mix and economic growth. International Review of Economics & Finance 2019;59:253–64.
- [6] Statista. Annual production of plastics worldwide from 1950 to 2022 n.d. <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>.
- [7] Jahirul M, Koh W, Brown R, Senadeera W, O'Hara I, Moghaddam L. Biodiesel Production from Non-Edible Beauty Leaf (Calophyllum inophyllum) Oil: Process Optimization Using Response Surface Methodology (RSM). Energies (Basel) 2014;7:5317–31.