



Politechnika Poznańska  
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu



mgr inż. Patryk Urbański

## **Opracowanie i wdrożenie metody doboru układu oczyszczania spalin w pojazdach szynowych**

Rozprawa doktorska

Promotor  
prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz

Promotor pomocniczy  
dr inż. Piotr Michalak

Poznań 2025

## Spis treści

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Streszczenie.....                                                              | 4  |
| Abstract .....                                                                 | 6  |
| Wykaz ważniejszych skrótów i symboli .....                                     | 7  |
| 1.   Wprowadzenie .....                                                        | 8  |
| 2.   Kolej w Polsce .....                                                      | 12 |
| 2.1.   Infrastruktura .....                                                    | 12 |
| 2.2.   Przewozy kolejowe.....                                                  | 13 |
| 2.2.1.   Pasażerskie.....                                                      | 13 |
| 2.2.2.   Towarowe.....                                                         | 16 |
| 2.3.   Tabor kolejowy .....                                                    | 18 |
| 2.3.1.   Pojazdy pasażerskie .....                                             | 18 |
| 2.3.2.   Pojazdy towarowe.....                                                 | 23 |
| 2.3.3.   Pojazdy specjalne.....                                                | 26 |
| 3.   Regulacje prawne.....                                                     | 32 |
| 3.1.   ORE B13 Rp22 i karty UIC.....                                           | 32 |
| 3.2.   Normy Stage .....                                                       | 35 |
| 3.2.1.   Wprowadzenie .....                                                    | 35 |
| 3.2.2.   Stage I i Stage II.....                                               | 36 |
| 3.2.3.   Stage III i Stage IV .....                                            | 37 |
| 3.2.4.   Stage V .....                                                         | 38 |
| 3.2.5.   Testy badawcze norm Stage .....                                       | 39 |
| 3.3.   Odniesienie norm emisji spalin do pojazdów kolejowych .....             | 42 |
| 3.4.   Utrzymanie pojazdów szynowych w Polsce i stan jednostek napędowych..... | 45 |
| 4.   Analiza udziałów czasu pracy pojazdów szynowych .....                     | 50 |
| 4.1.   Czynniki wpływające na parametry pracy.....                             | 50 |
| 4.2.   Udziały czasów pracy .....                                              | 52 |
| 4.3.   Praca na biegu jałowym.....                                             | 58 |
| 4.4.   Podsumowanie rozdziału .....                                            | 63 |
| 5.   Cel i zakres pracy .....                                                  | 66 |
| 6.   Metodyka badań.....                                                       | 68 |
| 6.1.   Aparatura pomiarowa .....                                               | 68 |
| 6.2.   Pojazd, infrastruktura oraz przygotowanie do badań.....                 | 74 |
| 7.   Badania rzeczywistej charakterystyki pracy i emisji spalin.....           | 81 |
| 7.1.   Charakter pracy pojazdu specjalnego .....                               | 81 |
| 7.2.   Pomiary emisji PM i PN .....                                            | 91 |
| 8.   Symulacje numeryczne oraz dobór układu oczyszczania spalin.....           | 94 |
| 8.1.   Opis prac.....                                                          | 94 |
| 8.2.   Metodyka badań symulacyjnych .....                                      | 94 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 8.3. Obliczenia numeryczne ..... | 100 |
| 9. Badania weryfikacyjne.....    | 104 |
| 10. Wnioski.....                 | 110 |
| Bibliografia .....               | 112 |

## Streszczenie

Praca dotyczy procesu doboru filtra cząstek stałych do retrofitingu eksploatowanego pojazdu kolejowego specjalnego przeznaczenia za pomocą obliczeniowej mechaniki płynów oraz weryfikacji rozwiązania w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Opiswane rozwiązanie pozwala na ograniczenie emisji związków szkodliwych spalin z eksploatowanych pojazdów bez ingerencji w konstrukcję silnika spalinowego.

Wprowadzanie coraz bardziej rygorystycznych norm emisji spalin, wymusza na producentach silników oraz pojazdów stosowanie bardziej wyrafinowanych rozwiązań w celu redukcji związków szkodliwych zawartych w spalinach. Przepisy dotyczące dopuszczalnych wartości emisji spalin obejmują również grupę mobilnych maszyn pozadrogowych NRMM, do której należą pojazdy kolejowe. Aktualnie każdy dopuszczany na rynek silnik spalinowy musi spełniać wymagania normy Stage V. Przepisy te dotyczą jednak nowych jednostek napędowych. W przypadku eksploatowanych silników spalinowych w pojazdach kolejowych, obowiązującymi wymaganiami emisyjnymi są te z roku jego dopuszczenia na rynek. Tabor kolejowy w Polsce odznacza się znaczną średnią wieku oraz stopniem wyeksploatowania. Z tego względu pojazdy kolejowe starszej generacji cechują się podwyższoną emisyjnością nie tylko względem nowszych pojazdów, ale również względem wymagań emisyjnych według których zostały dopuszczone na rynek.

Najskuteczniejszym rozwiązaniem w celu redukcji negatywnego wpływu emisji spalin na środowisko jest wymiana wyeksploatowanego taboru na nowy. Wiąże się to jednak ze znacznymi nakładami finansowymi. Z tego względu proces ten zachodzi bardzo powoli. Innymi rozwiązaniami są modernizacja, remotoryzacja, tj. wymiana silnika na nowy oraz okresowe naprawy związane z utrzymaniem pojazdu na poziomie P4 lub P5. Rozwiązania te są popularne ze względu na znacznie mniejsze koszty względem zakupu nowego taboru. Jednakże, działania te odbywają się zazwyczaj zgodnie z resursem utrzymaniowym pojazdu, który dla naprawy głównej jednostki napędowej, lub jej wymiany, może wynosić od kilku do kilkunastu lat.

Biorąc pod uwagę powyższe, w celu redukcji emisji spalin z eksploatowanych pojazdów kolejowych, zdecydowano się wykorzystać retrofitting układu oczyszczania spalin. Przeanalizowano literaturę w celu przeglądu dostępnych rozwiązań oraz wykonanych badań w tym obszarze tematycznym. Nie znaleziono informacji na temat prac związanych z retrofittingiem pojazdu kolejowego specjalnego przeznaczenia. Scharakteryzowano tabor kolejowy w Polsce pod względem rodzaju, przeznaczenia, liczebności oraz średniej wieku. Przeanalizowano udziały czasu pracy pojazdów szynowych.

Następnie przeprowadzono pomiary dotyczące charakteru oraz udziałów czasu pracy pojazdu specjalnego podczas pełnej zmiany roboczej trwającej 12h. Pojazd był eksploatowany w rzeczywistych warunkach na linii kolejowej PKP. Przedmiotem jego pracy był przewóz i uzupełnienie tłucznia pod torami. Na bazie zarejestrowanych wyników podzielono wykonaną pracę ze względu na rodzaj, obciążenie oraz zakresy prędkości. Praca na biegu jałowym stanowiła największy udział czasu pracy i wyniosła 61,7%.

W kolejnym etapie przeprowadzono badania w rzeczywistych warunkach eksploatacji na bocznicę kolejowej z wykorzystaniem pojazdu do retrofitingu tego samego typu, co pojazd eksploatowany podczas badań udziałów czasu pracy. Wykorzystano mobilną aparaturę do pomiaru emisji spalin typu PEMS w celu zbadania i określenia problemu emisyjnego związanego z emisją cząstek stałych pod względem ich masy oraz liczby. Badania przeprowadzono dla kilku opracowanych przejazdów różniących się od siebie profilem pochylenia wzdłużnego torów, wykonywaną pracą oraz obciążeniem. Oszacowano średnią emisję pojazdu specjalnego dla trasy rzeczywistej w trakcie zmiany roboczej.

Określone zostały parametry dotyczące rozmiarów oraz konstrukcji nośnika trzech filtrów cząstek stałych łączących w sobie rozwiązania filtrów typu wall-flow oraz flow-through. Wytypowane rozwiązania filtrów DPF zamodelowano w programie do wirtualnego projektowania CAD. Następnie na podstawie wyników badań z poprzedniego etapu określono trzy charakterystyczne punkty pracy. W celu analizy parametrów pracy zamodelowanych filtrów wykorzystano obliczeniową mechanikę płynów. Przeprowadzono analizy numeryczne trzech modeli filtrów dla trzech różnych warunków pracy. Na podstawie otrzymanych wyników wybrany został model do retrofitingu pojazdu kolejowego, cechujący się najkorzystniejszymi wskaźnikami pracy.

Pojazd szynowy został wyposażony w wytypowany filtr, a następnie przeprowadzono weryfikację poprawności doboru pod względem redukcji emisji cząstek stałych podczas rzeczywistej eksploatacji na bocznicy kolejowej. Oszacowano średnią emisję PM oraz PN dla przejazdu po trasie w rzeczywistych warunkach eksploatacji podczas pełnej zmiany roboczej. Wykorzystanie prototypowego filtra do retrofitingu pojazdu szynowego pozwoliło na średnią redukcję PM o 32,6%, a PN o 83% dla rozpatrywanej trasy

## Abstract

This paper discusses the process of selecting a diesel particulate filter for retrofitting an in-service auxiliary rail vehicle using computational fluid dynamics and verifying the solution under real-world operating conditions. This solution reduces harmful exhaust emissions from in-service vehicles without altering the internal combustion engine design.

The launching of increasingly stringent exhaust emission standards forces engines and vehicles producers to implement more sophisticated solutions to reduce harmful compounds contained in exhaust gases. Regulations regarding exhaust emission limits also apply to the NRMM (Non-Road Mobile Machinery) group, which includes rail vehicles. Currently, every combustion engine approved for market must meet the Stage V standard. However, these regulations apply to new power units. For railway combustion engines in service, the applicable emission requirements are those from the year of their production. Polish railway rolling stock is characterized by a significant average age and degree of wear. For this reason, older generation rail vehicles suffer from increased emissions not only compared to newer vehicles but also compared to the emission requirements under which they were approved for market.

The most effective solution for reducing the negative impact of exhaust emissions on the environment is to replace worn-out vehicles with new ones. However, this requires significant financial outlays. Therefore, this process is very slow. Other solutions are modernization, remotorization, i.e., replacing the engine with a new one, and periodic repairs related to maintaining the vehicle at the P4 or P5 level. These solutions are popular due to the significantly lower costs compared to purchasing new vehicles. However, these activities are usually carried out in accordance with the vehicle's maintenance schedule, which can range from several to a dozen years for the repair or replacement of the main drive unit.

Considering the above, in order to reduce exhaust emissions from operating railway vehicles, it was decided to retrofit the exhaust aftertreatment system. The literature was analyzed to review available solutions and research conducted in this area. No information was found on retrofitting auxiliary rail vehicles. The rolling stock in Poland was characterized in terms of type, purpose, number, and average age. The share of rail vehicles operating time was analyzed.

In the next step, measurements were taken of work specification and share of the auxiliary rail vehicle's operating time during a full 12-hour shift. The vehicle was operated under real-world conditions on a PKP railway line. Its task was to transport and replenish ballast under the tracks. Based on the recorded results, the work performed was divided by type, load, and speed range. Idling constituted the largest share of operating time, accounting for 61.7%.

The next stage involved testing auxiliary rail vehicle for retrofit under real-world operating conditions on a railway siding. A mobile PEMS exhaust emission measurement system was used to investigate and define the emission problem related to particulate matter emissions, in terms of their mass and number. The tests were conducted for several designed runs, each differing in terms of track gradient, type of work and load. The average emission of the auxiliary rail vehicle for the actual route during a work shift were estimated.

The dimensions and structure of the porous media for three diesel particulate filters, combining wall-flow and flow-through filter solutions, were determined. The selected DPF filter were modeled in a virtual CAD design program. Three characteristic operating points were then determined based on the test results from the previous stage. Computational fluid dynamics was used to analyze the operating parameters of the modeled filters. Numerical analyses of the three filter models were conducted for three different operating conditions. Based on the obtained results, the model with the most favorable operating parameters was selected for rail vehicle retrofitting.

The rail vehicle was retrofitted with the selected filter. The correctness of the selection process was verified in terms of reducing particulate matter emissions during real operation on the railway siding. Average PM and PN emissions were estimated for a full shift of operation along the route under real operating conditions. Using the prototype filter for rail vehicle retrofitting allowed for an average PM reduction of 32.6% and PN reduction of 83% for the route under consideration.

## Wykaz ważniejszych skrótów i symboli

|                 |                                                               |
|-----------------|---------------------------------------------------------------|
| CAN             | Controllor Area Network                                       |
| CFD             | Computational Fluid Dynamics                                  |
| CO              | Tlenek węgla                                                  |
| CO <sub>2</sub> | Dwutlenek węgla                                               |
| CUC             | Clean-up Catalyst                                             |
| DOC             | Diesel Oxidation Catalyst                                     |
| DPF             | Diesel Particle Filter                                        |
| DSU             | Dokumentacja Systemu Utrzymania                               |
| DTR             | Dokumentacja Techniczno-Ruchowa                               |
| ECU             | Electronic Control Unit                                       |
| EEPS            | Engine Exhaust Particle Sizer                                 |
| EGR             | Exhaust Gas Recirculation                                     |
| EVN             | European Vehicle Number                                       |
| EVR             | European Vehicle Register                                     |
| EZT             | Elektryczny Zespół Trakcyjny                                  |
| GHG             | Gazy cieplarniane                                             |
| HC              | Węglowodory                                                   |
| HDV             | Heavy Duty Vehicles                                           |
| HEPA            | High Efficiency Particulate Air Filter                        |
| IC              | Intercity                                                     |
| LDV             | Light Duty Vehicles                                           |
| Ł-PIT           | Sieć Badawczą Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny |
| NDIR            | Non-Dispersive Infrared                                       |
| NO <sub>x</sub> | Tlenki azotu                                                  |
| NRMM            | Non-Road Mobile Machinery                                     |
| NRSC            | Non-Road Steady Cycle                                         |
| NRTC            | Non-Road Transient Cycle                                      |
| ORE             | Office for Research and Experiment                            |
| PC              | Passenger Car                                                 |
| PEMS            | Portable Emission Measurement System                          |
| pkm             | pasażerokilometr                                              |
| PM              | Particulate matter                                            |
| PN              | Particle Number                                               |
| poc-km          | Pociągokilometr                                               |
| RDE             | Real Driving Emission                                         |
| SCR             | Selective Catalytic Reduction                                 |
| SOF             | organiczna frakcja rozpuszczalna                              |
| SOL             | organiczna frakcja nierozpuszczalna                           |
| SZT             | Spalinowy Zespół Trakcyjny                                    |
| tkm             | tonokilometr                                                  |
| UE              | Unia Europejska                                               |
| UIC             | Union Internationale des Chemins de fer                       |
| UTK             | Urząd Transportu Kolejowego                                   |
| WTO             | Warunki Techniczne Odbioru                                    |
| ZI              | Zapłon Iskrowy                                                |
| ZS              | Zapłon Samoczynny                                             |

# 1. Wprowadzenie

Transport pełni ważną rolę w społeczeństwie ze względu na znaczący wpływ na rozwój przemysłu i gospodarki [1,2]. Silniki spalinowe są głównym źródłem napędu, ich udział we wszystkich pojazdach na świecie szacuje się na około 99,8% [3]. Realizacja przewozów odbywa się zatem głównie za pomocą środków transportu z silnikami spalinowymi. Wykorzystywane do tego celu paliwa w 95% oparte są na produktach ropopochodnych [4,5]. W wyniku reakcji spalania paliw węglowodorowych głównymi produktami spalania są dwutlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ) oraz woda. Z tego powodu  $\text{CO}_2$  odnoszone jest jako ekwiwalent zużytego paliwa lub energii. Szacuje się, że emisja z transportu stanowi 23% całkowitej emisji  $\text{CO}_2$  na świecie [6]. Według szacunków i obliczeń oczekuje się, że do 2050 roku, w zależności od założeń, udział ten wyniesie 30%-50% [6]. W Unii Europejskiej (UE) całkowita emisja  $\text{CO}_2$  z transportu w 2020 roku była wyższa od globalnej średniej i wynosiła 27% [7]. Rozwój sektora transportowego w UE na przestrzeni lat był znaczący. Potwierdzają to dane dotyczące wzrostu emisji  $\text{CO}_2$  o 25% oraz gazów cieplarnianych (GHG) o 34% względem 1990 roku. Największym źródłem emisji spalin jest transport drogowy, który - w przypadku Europy w 2021 roku - był odpowiedzialny za 71,7% całkowitej emisji  $\text{CO}_2$  w sektorze transportu [8]. W przypadku pozostałych rodzajów transportu, takich jak transport wodny, powietrzny i kolejowy, ich udział w ogólnej emisji  $\text{CO}_2$  jest znacząco mniejszy.

Kolej w 2021 roku odpowiadała za 0,4% całkowitej emisji  $\text{CO}_2$  w Europie. Dane te dotyczyły emisji bezpośredniej z pojazdów szynowych z silnikiem spalinowym [8]. Uwzględniając emisję pośrednią, tj. pochodzącą z procesów wytwarzania energii elektrycznej do zasilania trakcji kolejowej dla pojazdów elektrycznych, udział ten wynosi około 1% całkowitej emisji [9,10]. Na przestrzeni lat 1990-2019 udział emisji GHG w transporcie kolejowym zmniejszył się o niemal 70%. Jest to największa redukcja emisji spośród wszystkich rodzajów transportu. Kolej odznacza się znaczną efektywnością energetyczną oraz jest jednym z najbardziej przyjaznych dla środowiska rodzajem transportu [11–13]. Jest to spowodowane przede wszystkim bardzo korzystnymi wskaźnikami przewozowymi. Jeden skład kolejowy jest w stanie przetransportować znacznie większą ilość towarów oraz liczbę pasażerów, niż pojazd samochodowy. Należy również uwzględnić stopniową elektryfikację linii kolejowych, przede wszystkim w Europie [14]. Linia zelektryfikowana umożliwia poruszanie się pojazdów elektrycznych, które lokalnie nie emitują spalin. Jednakże wciąż wiele linii kolejowych jest nieelektryfikowanych, wymusza to zastosowanie uniwersalnych pojazdów z silnikiem spalinowym, które mogą poruszać się po obu rodzajach linii.

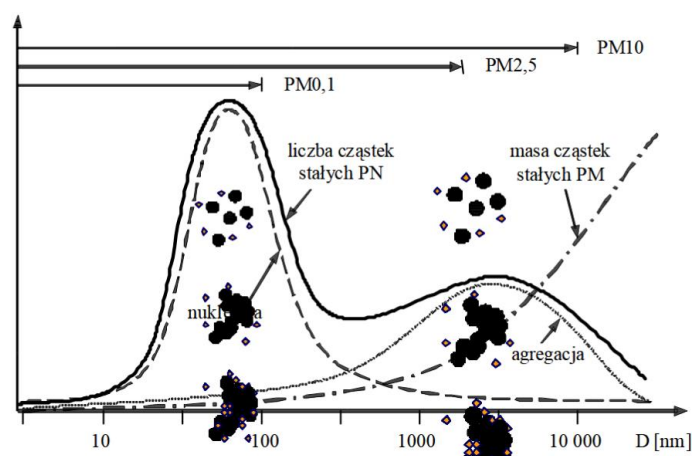
Pomimo pozytywnych aspektów dotyczących wykorzystania pojazdów szynowych bardzo często problemem w transporcie kolejowym jest stan techniczny taboru. Wiele inwestycji taborowych, szczególnie w Polsce, skupia się na renowacji lub modernizacji pojazdów, zamiast na wymianie jednostek na nowe. Powodem są o wiele niższe koszty w porównaniu do zakupu nowych pojazdów. W planie inwestycji w towarowy tabor kolejowy do 2023 roku zakładano, że inwestycje obejmą 167 lokomotyw, z czego 59,3% miało być odnowionych, 24% dotyczyło zakupu używanych, a 10,2% miało być zmodernizowanych. Pozostałe pojazdy (6,5%) miały być wypożyczone (6 szt.) lub zakupione jako nowe (5 szt.) [15]. Działania te sprawiają, że średnia wieku taboru w Polsce jest wysoka. Dodatkowo, Polska znajduje się w czołówce Europy pod względem ilostanu posiadanego taboru kolejowego. Określenie dokładnej liczby pojazdów szynowych w poszczególnych krajach Europy, w celach porównawczych, jest niemożliwe. Jednakże uwzględniając dane Eurostatu [16] oraz Urzędu Transportu Kolejowego (UTK) [17], pod względem wykonanej pracy przewozowej i przetransportowanej masy ładunków, Polska znajduje się na drugim miejscu w Europie za Niemcami. Przewozy te są wykonywane w znacznej mierze za pomocą pojazdów spalinowych.

Mały udział kolei w całkowitej emisji  $\text{CO}_2$  z transportu nie oznacza, że pojazd kolejowy lokalnie emituje małą ilość związków szkodliwych. W pojazdach szynowych są stosowane wielkogabarytowe kolejowe silniki spalinowe o dużej mocy. Wykorzystanie zaawansowanych wiekowo oraz wyeksploatowanych pojazdów z silnikiem spalinowym o dużej objętości skokowej może prowadzić do podwyższonej emisyjności [18] zarówno gazowych jak i stałych związków toksycznych. Osoba przebywająca w otoczeniu takiego obiektu, szczególnie w ograniczonej lub częściowo ograniczonej przestrzeni, jest narażona na negatywny wpływ związków szkodliwych, znajdujących się w gazach wylotowych [19]. Duże stężenie zanieczyszczeń w powietrzu, szczególnie w ośrodkach

miejskich [20], w 2021 roku było przyczyną 8,1 miliona przedwczesnych zgonów [21]. Zanieczyszczenie powietrza było drugą najczęściej występującą przyczyną przedwczesnej śmierci dzieci poniżej 5 roku życia, zaraz po niedożywieniu. Ponad 1 na 8 zgonów na świecie był spowodowany przez zanieczyszczenie powietrza. Nawet stosunkowo niewielki udział pojazdów szynowych w całkowitej emisji z transportu, dokłada się do tego poważnego problemu zdrowotnego.

Podczas spalania paliw węglowodorowych, oprócz wody i  $\text{CO}_2$ , w wyniku spalania niepełnego i niecałkowitego, powstają również związki toksyczne. Gazowymi związkami w spalinach są przede wszystkim: tlenek węgla (CO), tlenek azotu (NO) oraz dwutlenek azotu ( $\text{NO}_2$ ) – nazywane tlenkami azotu ( $\text{NO}_x$ ) [22], a także niedopalone paliwo i olej tj. węglowodory (HC). W gazach spalinowych znajdują się również szczególnie niebezpieczne dla zdrowia cząstki stałe PM (Particulate Matter). W PM rozróżnia się dwie frakcje: organiczną frakcję rozpuszczalną SOF (Soluble Organic Fraction) oraz organiczną frakcję nierozpuszczalną SOL (Insoluble Fraction). Rdzeniem cząstki stałej jest węgiel stały odznaczający się strukturą porowatą. Z tego powodu węgiel stały ma możliwość absorpcji substancji znajdujących się w spalinach takich jak woda, siarka, metale, ale przede wszystkim skondensowanych frakcji SOF. Frakcje rozpuszczalne są węglowodarami, które pochodzą z niespalonego oleju silnikowego lub z paliwa [23]. Wyemitowane z silnika spalinowego PM odznaczają się zróżnicowanym kształtem oraz wielkością. Dodatkowo, skład i udział zaabsorbowanych substancji różni się w zależności od panujących warunków. Z tego powodu nie jest możliwe dokładne zdefiniowanie PM pod względem fizycznym oraz chemicznym.

Udział masowy frakcji rozpuszczalnej SOF w PM może się znacząco różnić i - w zależności od temperatury spalin - zawierać się w przedziale od 10% do 90%. Zazwyczaj udział SOF wzrasta wraz ze spadkiem temperatury spalin. Zawarte w cząstkach stałych frakcje rozpuszczalne SOF są toksyczne i kancerogenne, dlatego PM są tak niebezpieczne. Rozmiar PM również nie jest stały. Cząstki te łączą się ze sobą tworząc aglomeraty. Z tego powodu są klasyfikowane pod względem rozmiarowym. Głównymi zakresami rozmiarowymi są: cząstki duże o średnicy do  $10\ \mu\text{m}$  – PM<sub>10</sub>, cząstki drobne do  $2,5\ \mu\text{m}$  – PM<sub>2,5</sub>, cząstki bardzo drobne o średnicy do  $10\ \text{nm}$  oraz nanocząstki do  $10\ \text{nm}$ . W spalinach z silników spalinowych występują cząstki o średnicy większej niż  $10\ \text{nm}$  [23,24]. Innym wskaźnikiem wykorzystywanym do scharakteryzowania cząstek stałych jest ich liczba (Particle Number – PN). Cząstka stała podlega różnym procesom, które zmieniają jej właściwości fizyczne. W komorze spalania występuje proces nukleacji, inaczej zarodkowania. Wpływ na ten proces mają procesy spalania oraz zapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej. Poprzez nukleację zmienia się liczba cząstek. Innym procesem jest aglomeracja występująca w układzie wylotowym silnika. Proces ten ma wpływ na zmianę powierzchni, a w konsekwencji wielkość cząstek stałych (Rys. 1.1). Występująca również w układzie wylotowym dyfuzja ma wpływ na zmianę masy PM.

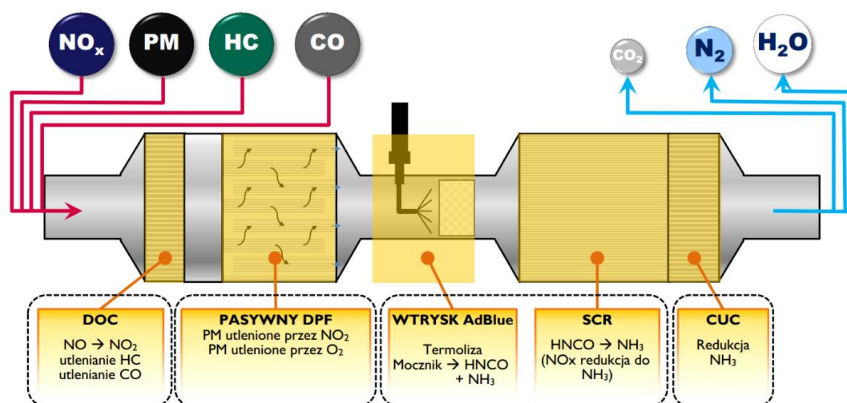


Rys. 1.1. Rozkład wymiarowy cząstek stałych z podziałem na liczbę cząstek stałych oraz ich masę podczas procesu nukleacji i agregacji [23,25]

Z powodu negatywnego wpływu związków toksycznych spalin na zdrowie i środowisko, wprowadzone zostały normy emisji spalin, które określają dopuszczalne limity emisji związków szkodliwych. Aktualne ograniczenia dotyczą masy emitowanych związków, a w przypadku PM

dodatkowo ich liczby. Ograniczanie dopuszczalnych poziomów emisji spowodowało konieczność stosowania rozwiązań mających na celu redukcję emisji spalin. Głównym rozwiązaniem są pozasilnikowe układy oczyszczania spalin. W silnikach o Zapłonie Samoczynnym (ZS) stosowane są reaktory oraz filtry, które utleniają, redukują oraz wychwytyują związki toksyczne spalin. W celu redukcji emisji HC oraz CO stosuje się utleniający reaktor katalityczny (DOC – Diesel Oxidation Catalyst). Jego wnętrze jest pokryte powierzchnią katalityczną, która obniża temperaturę zachodzenia procesu utleniania. W DOC utlenianiu ulega również NO do postaci NO<sub>2</sub>. Do redukcji tlenków azotu wykorzystywany jest reaktor selektywnej redukcji katalitycznej (SCR - Selective Catalytic Reduction). Do układu wylotowego wtryskiwany jest 32,5% wodny roztwór mocznika. Zachodzi wtedy reakcja termolizy, a z roztworu wydzielają się amoniak. Związek ten w obecności katalizatora redukuje tlenki azotu do nieszkodliwych azotu i wody. Za SCR znajduje się dodatkowo reaktor CUC (Clean-up Catalyst) dla nieprzereagowanego amoniaku. Do wychwyty PM z przepływających spalin służą filtry cząstek stałych DPF (Diesel Particle Filter) (Rys. 1.2).

Filtry DPF można podzielić na dwa typy ze względu na budowę. Typ wall-flow jest zbudowany z ceramicznych równolegle ułożonych kanałków, naprzemiennie zamkniętych od strony wlotu i wylotu. Przepływające związki gazowe wpływając do otwartego kanału mogą poruszać się dalej jedynie przez porowate ściany do kanału otwartego od strony wylotu. Cząstki stałe w większości nie mają takiej możliwości i pozostają w kanale, osadzając się na ściankach. Drugim typem jest wykonywany z metalu przepływowy filtr flow-through, który ma mniejszą skuteczność filtracji niż filtr wall-flow, jednak jest tańszy. Podczas procesu spalania, który jest procesem egzotermicznym, oddawane jest do otoczenia ciepło, a temperatura wzrasta. Z tego powodu przy stosowaniu pasywnego DPF, DOC jest zazwyczaj położony przed lub jest scalony z DPF w celu uzyskania korzystniejszych warunków do regeneracji DPF ze zgromadzonych cząstek stałych. Zintegrowany układ łączący DOC z DPF jest nazywany układem CRT (Continuously Regenerating Trap).



Rys. 1.2. Działanie układu oczyszczania spalin wprowadzone przez firmę Iveco [26,27]

Nowo produkowane pojazdy lub silniki, w zależności od klasyfikacji, muszą pozytywnie przejść proces homologacji, w celu wprowadzenia go na rynek. Jednakże dotyczy to pojazdów nowych, które są weryfikowane pod względem emisyjnym jedynie raz. W przypadku starszych maszyn, które są wciąż eksploatowane, obowiązują je normy emisji z roku, w którym zostały wprowadzone na rynek. W związku z tym, pomimo obowiązywania aktualnych, bardziej restrykcyjnych norm, w znacznej większości wciąż są eksploatowane pojazdy z homologacją zgodną z bardziej liberalnymi wymaganiami. Dodatkowo, pojazdy te często odznaczają się zwiększoną emisyjnością niż dopuszczalne wartości emisji obowiązującej normy z roku dopuszczenia [2,28]. W związku z tym zjawiskiem, w celu redukcji emisji spalin z eksploatowanych już pojazdów, o niższej normie spalin niż obowiązująca, zaczęto stosować retrofitting. Działanie to polega na doposażaniu pojazdów lub maszyn będących już w eksploatacji w nowoczesne układy oczyszczania spalin. Obiektami usprawnień są pojazdy wyprodukowane oraz dopuszczone zgodnie z normami starszymi niż aktualnie obowiązująca. Aplikacja nowego układu polega na braku zmian i ingerencji w konstrukcję jednostki napędowej. Wprowadzanie bardziej restrykcyjnych norm dotyczy jedynie nowo wprowadzanych na rynek jednostek. Z kolei tempo odmładzania floty pojazdów i maszyn jest powolne, a w przypadku kolei może trwać dekady. W związku z tym stosowanie retrofittingu, który jest opłacalny finansowo względem

zakupu nowego pojazdu lub jednostki napędowej, ma korzystnie oddziaływać na środowisko poprzez redukcję emisji spalin z eksploatowanych maszyn i pojazdów.

Retrofitting może dotyczyć różnych rodzajów pojazdów oraz wykorzystywać różne rodzaje układów oczyszczania spalin. W przypadku autobusów, w szwajcarskim mieście Biel-Bienne został przeprowadzony czteroletni projekt, w którym eksploatowane autobusy miejskie zostały poddane retrofitting'owi [29]. W miejsce tłumików zostały zamontowane filtry CRT, a także zbadana została przydatność emulsji wodnej oleju napędowego. Zastosowany filtr obniżał ilość CO oraz zadymienia podczas przyspieszeń, jednocześnie nie wpływając na ilość HC na biegu jałowym oraz NO<sub>x</sub>. Eksploatacja autobusów klasy Euro 2 i Euro 3 wyposażonych w filtr CRT była bezproblemowa. W Izraelu przez okres 12 miesięcy prowadzono badania na 18 autobusach miejskich i międzymiastowych [30]. Wytypowane zostały filtry typu CRT od trzech różnych producentów. Podczas rocznej eksploatacji w filtrach różnica ciśnień wywołana przez opory przepływu odkładających się PM nie przekroczyła 75 mbar i była daleka od alarmującej wartości 200 mbar. Oznacza to efektywnie działającą regenerację pasywną. Z kolei skuteczność filtracji PN wyniosła 96%. W Hong Kongu przeprowadzono program redukcji spalin z wykorzystaniem retrofittingu [31]. Sześć autobusów piętrowych klasy Euro 2 oraz Euro 3 zostało doposażonych w SCR oraz DPF lub filtr CRT. Dzięki temu rozwiązaniu emisja NO<sub>x</sub> została zredukowana o około 70%. W Stanach Zjednoczonych doposażono autobus szkolny w DOC oraz spiralny układ filtracji skrzyni korbowej [32]. Spowodowało to redukcję wszystkich PM o 20-94%.

Dla pojazdów z grupy NRMM również prowadzono badania dotyczące doposażania maszyn w pozasilnikowe układy oczyszczania spalin. W artykule Johnson et al. [33] opracowano i przedstawiono niezależnie sterowany system SCR do retrofittingu silników okrętowych. Na bazie przeprowadzonych badań redukcja NO<sub>x</sub> osiągnęła od 41% do 67%. W stacjonarnym, zmodyfikowanym teście NRSC zbadano emisję PM oraz PN z ciągnika rolniczego. Pojazd fabrycznie wyposażony w układ recyrkulacji spalin (Exhaust Gas Recirculation – EGR) oraz DOC doposażono w filtr DPF [34,35]. Użycie DPF podczas zmodyfikowanego testu NRSC spowodowało redukcję średniej ważonej emisji PM o 53%, a PN o 49%. W Stanach Zjednoczonych został opracowany i skomercjalizowany dedykowany układ oczyszczania spalin dla lokomotyw liniowych [36]. System składał się z DOC i SCR i został zaprojektowany do redukcji emisji NO<sub>x</sub> poniżej normy Tier 4. Jednocześnie system ten umożliwia redukcję znacznych ilości CO, HC oraz PM, co w przyszłości może umożliwić redukcję tych związków również poniżej dopuszczalnego poziomu emisji spalin normy Tier 4.

Prace i badania dotyczące retrofittingu pojazdów szynowych są wciąż względnie mało rozpoznany obszarem. Wiele rozwiązań mających na celu redukcję emisji spalin odbywa się poprzez modernizację taboru, remotoryzację tj. wymianę jednostki napędowej na nową lub zakup nowych pojazdów. Działania te, pomimo swojej skuteczności pod względem redukcji emisji związków toksycznych z pojazdów szynowych, wymagają jednak znacznych nakładów finansowych. Dodatkowo, redukcja emisji spalin z pojazdów bardziej zaawansowanych wiekowo, poprzez modernizację lub remotoryzację pojazdów, obejmuje właściwie jedynie pojazdy wymagające napraw na odpowiednio wysokim poziomie, które przypadają co kilka lub kilkanaście lat. Z tego powodu znaczny udział spalinowych pojazdów kolejowych w Polsce może odznaczać się podwyższoną emisją spalin. Z wymienionych powodów, w pracy podjęto próbę opracowania i wdrożenia metody mającej na celu dobór i doposażenie odpowiedniego układu oczyszczania spalin w formie DPF do pojazdu kolejowego.

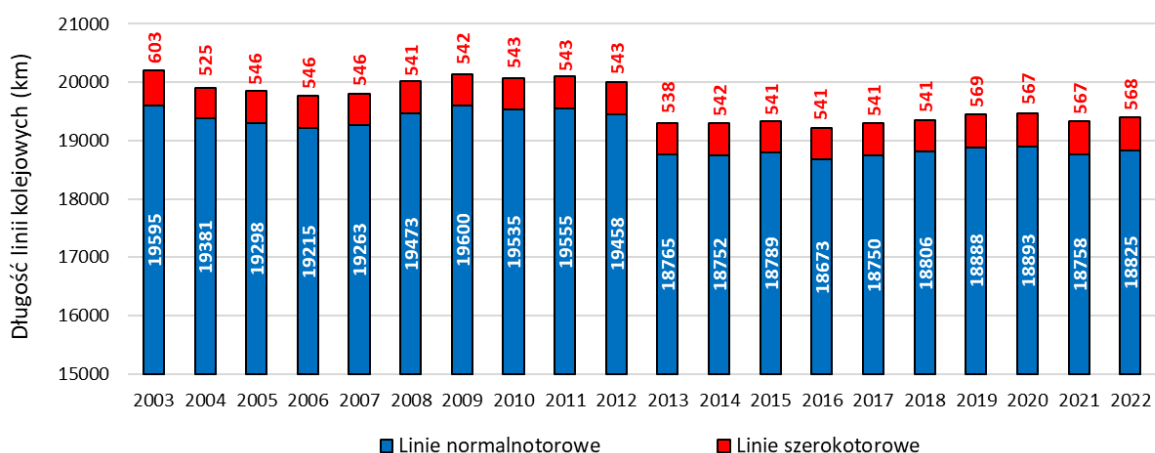
## 2. Kolej w Polsce

### 2.1. Infrastruktura

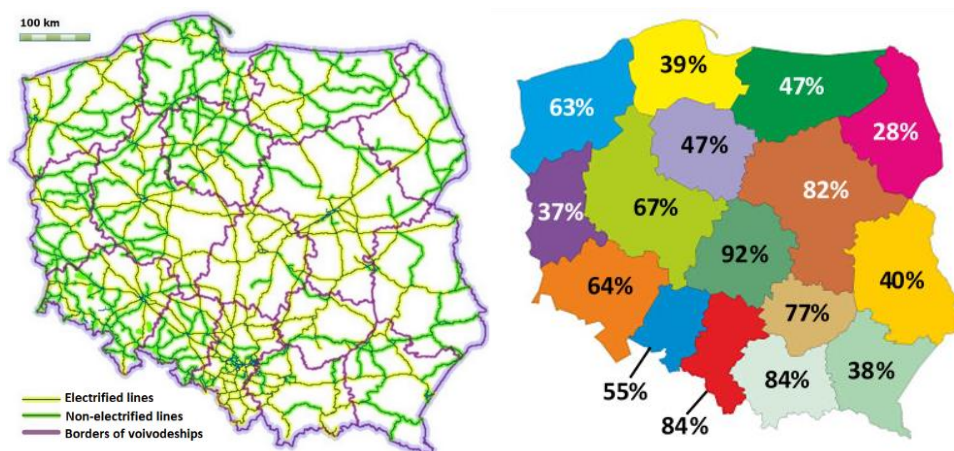
Według danych UTK [37] w Polsce w 2022 roku było użytkowanych 19393 km linii kolejowych, w tym 18825 km normalnotorowych i 568 km szerokotorowych (Rys. 2.1). Na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat odnotowano zmniejszenie długości linii kolejowych o 805 km, co oznacza redukcję o 4%. Największą redukcję rok do roku odnotowano między latami 2012-2013 kiedy to wyłączono z użytkowania 698 km linii kolejowych (redukcja o 3,5%).

Biorąc pod uwagę rodzaj linii kolejowych, linie zelektryfikowane stanowiły 63% udziału wszystkich linii [38]. Pozostała część jest liniami niezelektryfikowanymi, czyli nie posiada podwieszanej trakcji elektrycznej. Oznacza to, że poruszać się po nich mogą jedynie pojazdy z własnym źródłem napędu. W praktyce oznacza to konieczność wykorzystania na 37% linii kolejowych pojazdów z napędem spalinowym, głównie z silnikami z ZS. Aktualnie trwają również prace nad wprowadzaniem pojazdów z alternatywnymi źródłami napędu, jednak jest to długotrwały i kosztowny proces [39–41].

Dodatkowo należy mieć na uwadze, że stopień zelektryfikowania linii kolejowych różni się znacznie w zależności od województwa. Najmniejszy udział zelektryfikowanych linii kolejowych jest w województwie Podlaskim (28%), a największy w województwie Łódzkim (92%). Należy jednak mieć na uwadze fakt, że aż 7 na 16 województw w większości posiada niezelektryfikowane linie kolejowe. Informacje na temat rodzaju linii kolejowych w Polsce oraz stopnia ich zelektryfikowania w poszczególnych województwach zostały przedstawione na rysunku 2.2.

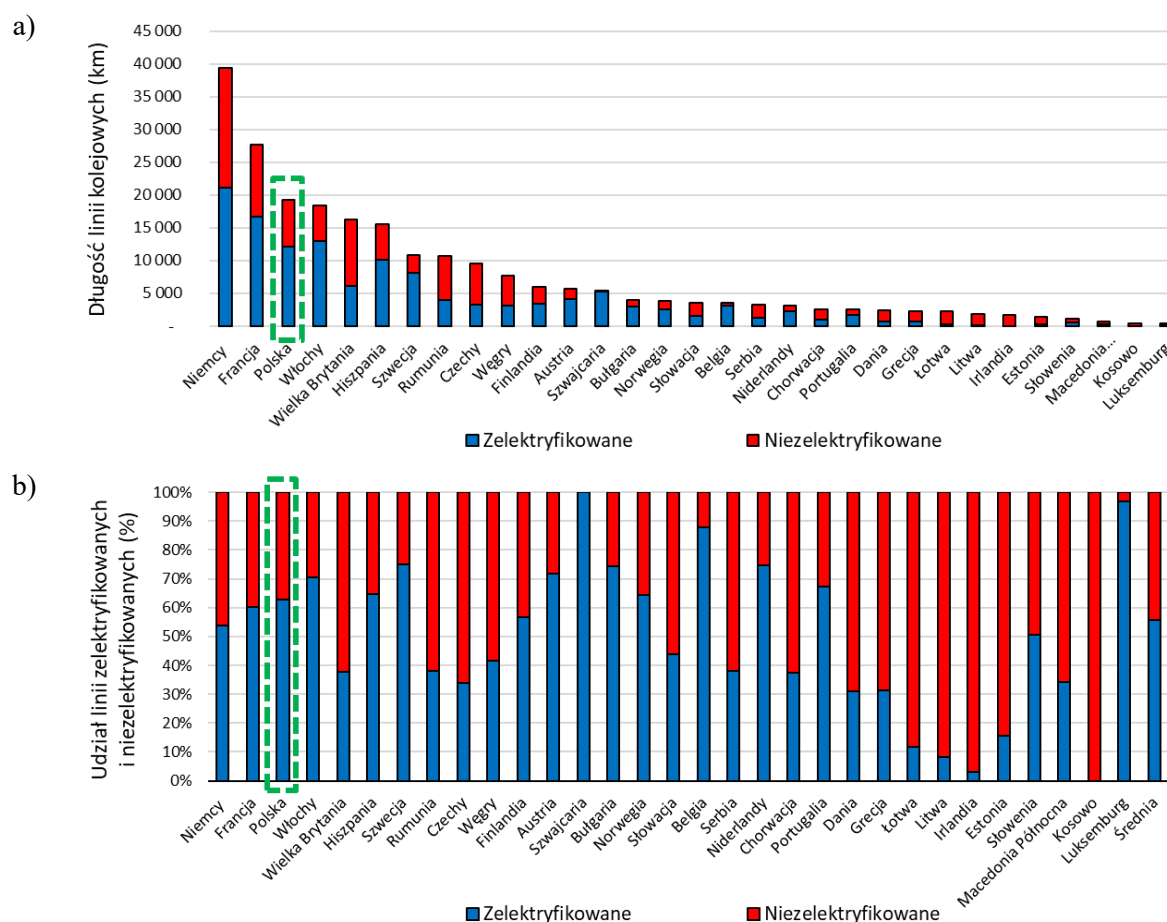


Rys. 2.1. Długość linii kolejowych w Polsce na przestrzeni lat 2003-2022 (na podstawie [37])



Rys. 2.2. Mapa linii kolejowych w Polsce, z podziałem na rodzaj linii oraz stopień zelektryfikowania w poszczególnym województwie [42,43]

W Europie w 2021 roku znajdowało się ponad 234 000 km linii kolejowych [38]. Polska znajdowała się w tym czasie na trzecim miejscu pod względem długości linii kolejowych odpowiadając za 8,3% całkowitego udziału. Wyprzedzają ją jedynie Niemcy (39 379 km) oraz Francja (27 704 km), które spośród wybranych w zestawieniu krajów stanowiły kolejno 16,8% i 11,9% całkowitego udziału. Warto nadmienić, iż w granicach wspomnianych krajów wraz z Włochami, Wielką Brytanią oraz Hiszpanią znajduje się 58% całkowitej długości linii kolejowych w Europie. W przypadku stopnia zelektryfikowania, największy udział posiada Szwajcaria z w pełni zelektryfikowanymi liniami kolejowymi oraz Luksemburg (97%). Z kolei najniższy udział posiada Irlandia (3%) oraz Kosowo (0%). Średni stopień zelektryfikowania linii kolejowych w Europie wynosi 56%, oznacza to, że w 17 z 31 krajów z zestawienia stopień elektryfikacji jest niższy od średniej Europejskiej. Polska ze stopniem zelektryfikowania na poziomie około 63% znajduje się o 7 punktów procentowych ponad średnią w zestawieniu (Rys. 2.3).



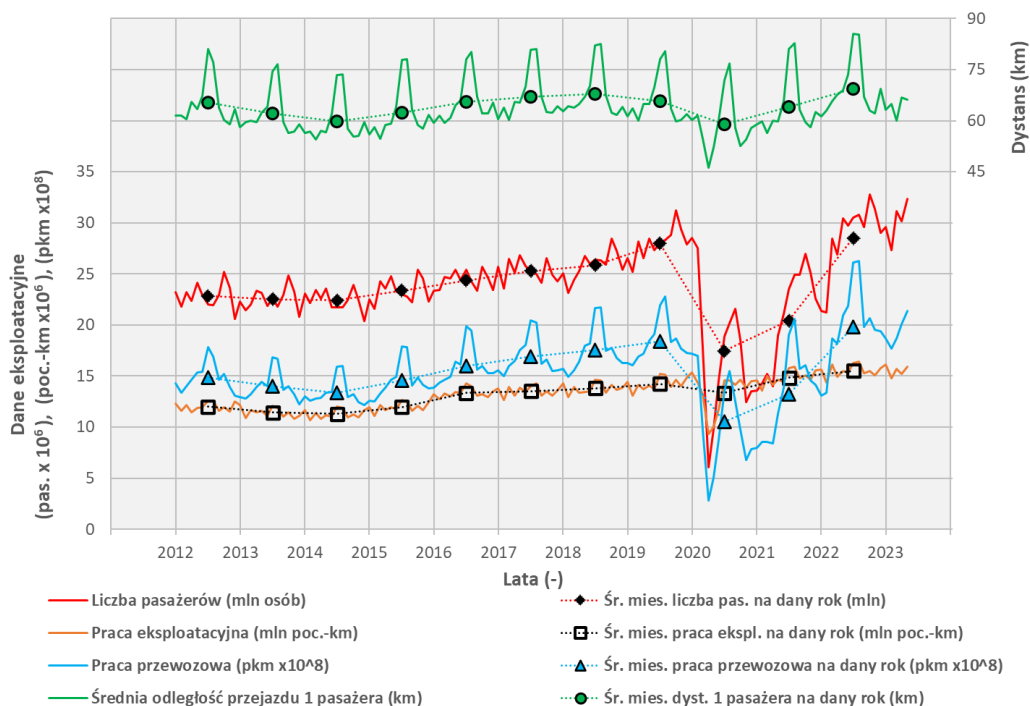
Rys. 2.3. Długość i udział linii kolejowych zelektryfikowanych i niezelektryfikowanych w poszczególnych krajach Europy (na podstawie [38])

## 2.2. Przewozy kolejowe

### 2.2.1. Pasażerskie

Kolejowe przewozy pasażerskie w Polsce w ostatnich latach zdobywały coraz większą popularność. Potwierdzają to dane Urzędu Transportu Kolejowego [37] za okres od stycznia 2012 do maja 2023, zamieszczone na rysunku 2.4. Według danych, średnia miesięczna liczba pasażerów za dany rok od 2012 do 2019 roku wzrosła od 22,8 mln do 28 mln pasażerów. Jednakże ze względu na wybuch pandemii odnotowany został ogromny spadek liczby pasażerów podróżujących koleją, gdzie zaraz po ogłoszeniu restrykcji, liczba pasażerów spadła do zaledwie 6,1 mln w kwietniu 2020 roku. Była to najniższa wartość odnotowana w zestawieniu. Od tego momentu, z lokalnymi przestojami wynikającymi z ograniczeń, odnotowywany jest przyrost wartości. W ostatnim notowanym miesiącu

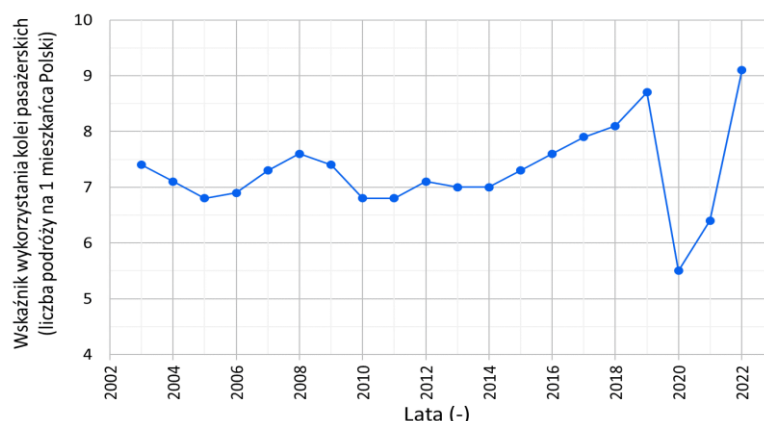
wartość ta wróciła do tej sprzed wybuchu pandemii i ma szansę w miesiącach letnich osiągnąć najwyższy wynik. Powodem tego może być między innymi wprowadzenie przez PKP Intercity (IC), programu zniżek i udogodnień na podróżowanie koleją w okresie letnim [44], a także uruchomienie większej liczby pociągów [45]. Przykładem opłacalności wprowadzania programów zniżkowych mających na celu popularyzację kolei jest między innymi rozwiązanie niemieckie [46,47], gdzie wprowadzono bilet kolejowy w cenie 9 Euro, ważny przez trzy miesiące.



Rys. 2.4. Szczegółowe dane miesięczne oraz średnie miesięczne dla danego roku dla kolejowych przewozów pasażerskich w Polsce na przestrzeni od I.2012 do V.2023 (na podstawie [37,43])

Dla opisywanego czynnika charakterystyczne jest występowanie wahań dla poszczególnych miesięcy. Ta sama sytuacja dotyczy takich wskaźników jak praca eksploatacyjna, praca przewozowa oraz średnia odległość przejazdu 1 pasażera. Lokalnym czynnikiem wpływającym na wskaźniki w pasażerskim transporcie kolejowym jest między innymi występowanie zwiększonego popytu na przewozy dalekobieżne w okresie letnim. W tych miesiącach odnotowane są zwiększone średnie dystanse pokonywane przez pasażera, a także praca przewozowa. Wiąże się to głównie z wyjazdami wakacyjnymi, gdzie pasażer pokonuje znacznie większe dystanse w celach urlopowych. Przeciwnieństwem są pozostałe okresy w roku, gdzie pasażerowie podróżują np. w celu dojazdu do pracy lub szkoły. Nie pokonują zatem znacznych dystansów, ze względu na mniejsze odległości między miejscem zamieszkania, a celem podróży.

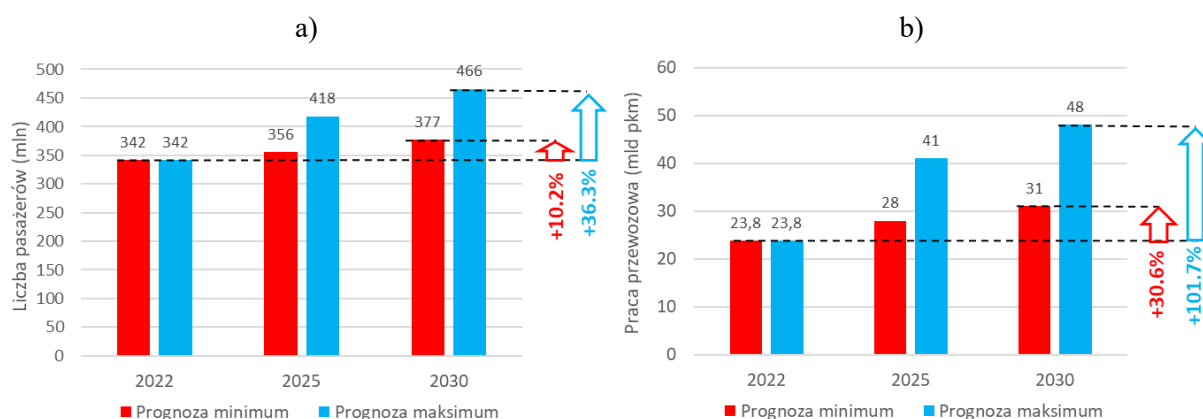
W przypadku wszystkich wymienionych wskaźników, od 2014 roku widoczna była tendencja wzrostowa, która została zahamowana oraz znacząco zredukowana przez wybuch pandemii. Jednakże - pomimo mniej korzystnego okresu dla przewoźników kolejowych - na podstawie zebranych danych można odnotować, iż powrót do sytuacji sprzed czasów występowania wirusa COVID-19 stał się faktem. Co więcej, osiągnięta została największa wartość w rozpatrywanym okresie wszystkich wskaźników przewozowych i eksploatacyjnych. Potwierdzenie zwiększania popularności kolei można również znaleźć analizując wskaźnik wykorzystania kolei pasażerskich, gdzie w ostatnim roku odnotowano najwyższą wartość w okresie dostępnych danych. W 2022 roku jeden mieszkaniec Polski podróżował średnio 9,1 razy (Rys. 2.5). Wpływ na to miały również, czynniki lokalne jak np. okres letni lub akcje marketingowe przewoźników, które spowodowały zwiększenie popytu na pasażerskie przewozy kolejowe. Oznacza to, że wykorzystanie taboru w kluczowych okresach jest największe i wymaga odpowiedniego utrzymania oraz zarządzania.



Rys. 2.5. Wskaźnik wykorzystania kolei pasażerskich w Polsce w latach 2002-2022  
(na podstawie [37])

Wpływ czynników zewnętrznych na pasażerskie przewozy kolejowe jest bardzo widoczny i odczuwalny. Każdy kryzys oraz wahania na rynku silnie korelują z osiągnięciami przewozowymi w pasażerskim transporcie kolejowym. Z tego względu bardzo wymagającym jest oszacowanie przyszłych wyników przewozowych. W roku 2019 powstał dokument „Strategia Zrównoważonego Rozwoju Transportu do 2030 roku” [48], w którym zawarte są prognozy dotyczące między innymi liczby przewożonych pasażerów oraz realizowanej pracy przewozowej w wariantach maksymalnym oraz minimalnym dla lat 2025 oraz 2030.

Na rysunku 2.6. zestawiono ze sobą osiągnięte rzeczywiste wyniki przewozowe z 2022 roku z prognozami dla lat 2025 i 2030. W raporcie przewiduje się, że w przypadku liczby przewożonych pasażerów (Rys. 2.6a) w prognozie minimum do 2030 roku nastąpi przyrost liczby pasażerów o +10,2% względem 2022 roku. Z kolei wariant maksimum mówi o tym, że do 2030 roku może nastąpić przyrost o +36,3% pasażerów (466 mln), ze wzrostem w 2025 roku na poziomie +22,2% (418 mln) względem 2022 roku. Jeszcze większe wzrosty są prognozowane w przypadku pracy przewozowej (Rys. 2.6b), gdzie względem 2022 roku (23,8 mld pasażerokilometrów (pkm)) w wariantcie minimum w 2025 roku przewiduje się wzrost o +17,6% (28 mld pkm), do osiągnięcia 31 mld pkm (+30,6%) w 2030 roku. Dla wariantu maksymalnego prognoza zakłada wzrost o 72,3% do poziomu 41 mld pkm w 2025 roku, do nawet 48 mld pkm w 2030 roku. Oznacza to w przypadku wariantu maksimum planowanie podwojenia pracy przewozowej w przeciągu 8 lat.



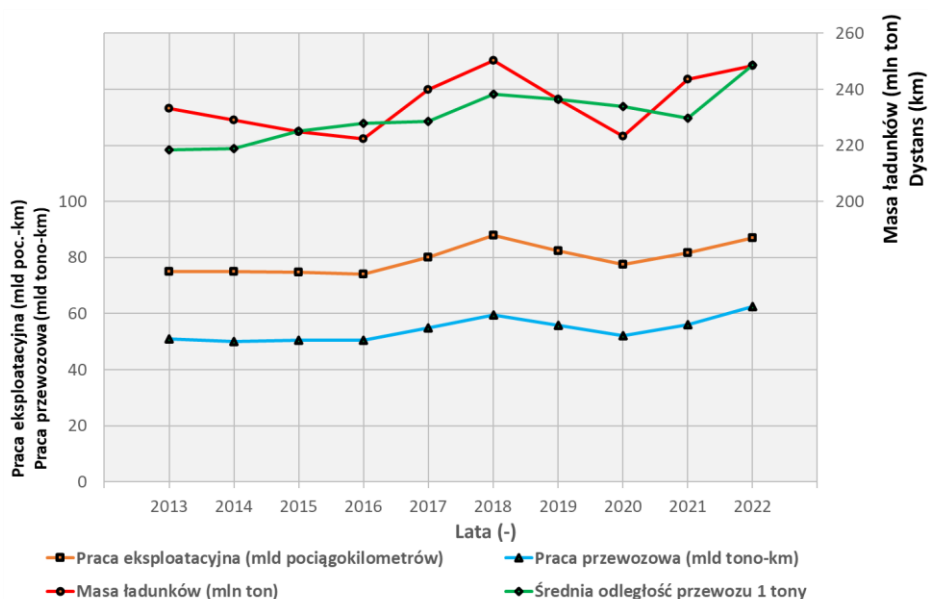
Rys. 2.6. Liczba przewiezionych pasażerów w 2022 roku oraz prognozy według Strategii Zrównoważonego Rozwoju Transportu do 2030 roku w latach 2025 oraz 2030:  
a) liczba pasażerów, b) praca przewozowa (na podstawie [37,48])

Czynnikami, które mogą pomóc w zwiększaniu pasażerskich wyników przewozowych jest dalszy wzrost wykorzystania kolei, szczególnie w przewozach aglomeracyjnych, w połączeniu z rozwojem

połączeń dalekobieżnych. Przewoźnicy pasażerscy muszą posiadać atrakcyjną ofertę przewozową, szczególnie względem transportu samochodowego, by zainteresowanie koleją rosło. Rozwój oferty przewoźników jest możliwy dzięki ciągłym inwestycjom kolejowym, w tym budową i naprawą linii kolejowych w celu polepszenia parametrów przewozowych i jakościowych. Należy jednakże mieć na uwadze, że opisane dane dotyczące prognoz bazują na dokumencie, który powstał w roku 2019, a więc przed pandemią oraz konfliktem zbrojnym na Ukrainie. Dokument nie uwzględnia więc takich zjawisk jak gwałtowny spadek liczby pasażerów podczas pandemii, czy chociażby napływu migrantów z granicy spowodowany wojną. Z tego powodu trudno jest ocenić dokładność oraz miarodajność prognoz, gdyż wiele rzeczy jest niemożliwe do przewidzenia, a może bardzo silnie wpływać na wyniki przewozowe.

## 2.2.2. Towarowe

W Polsce w 2018 roku łączna masa przewiezionych ładunków osiągnęła najwyższy wynik w przeciągu ostatniej dekady, tj. 250,3 mln ton (Rys. 2.7). Z kolei drugi najlepszy wynik w zestawieniu został osiągnięty w 2022 roku, gdzie wartość ta była niewiele mniejsza i wyniosła 248,6 mln ton. Wartość ta, oznacza wzrost o 2% względem roku poprzedniego (243,6 mln ton). Rozpatrując 2022 rok, z danych wynika, że największe wartości przewozowe odnotowano w marcu, co prawdopodobnie jest powiązane z wybuchem konfliktu zbrojnego na Ukrainie. Z powodu niepewnej sytuacji, wielu spedytorów, przewoźników i producentów musiało dostosować się do nowej sytuacji na rynku. Co więcej, w zestawieniu miesięcznym w marcu 2022 roku, wynik przewozowy był najwyższy w ostatnim dziesięcioleciu.



Rys. 2.7. Dane dotyczące kolejowego transportu towarowego w Polsce na przestrzeni lat 2013-2022 (na podstawie [37])

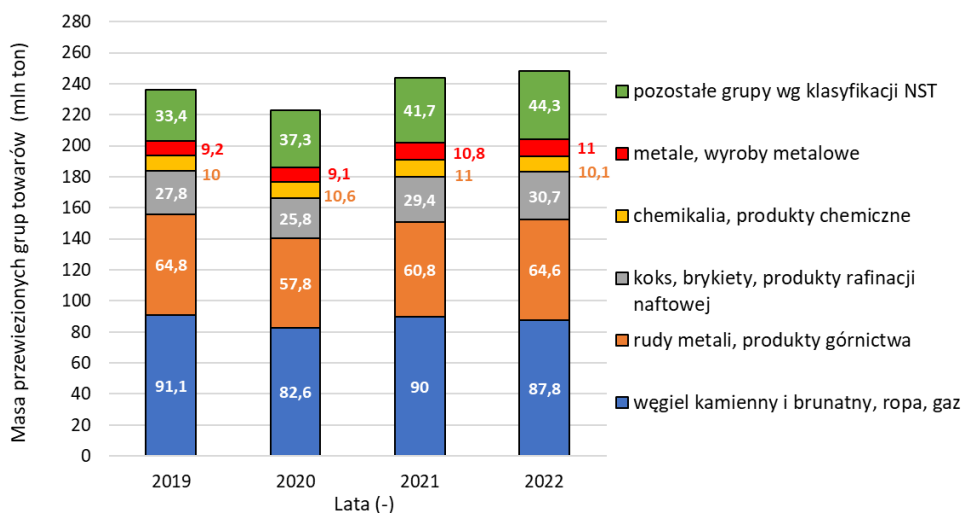
W przypadku pracy przewozowej 2022 rok był rekordowym pod tym względem, gdzie przekroczono granicę 60 mld tonokilometrów (tkm) po raz pierwszy od ponad 20 lat, dokładniej było to 62,6 mld tkm. Względem roku 2021 jest to wartość większa o 6,5 mld tkm, oznacza to wzrost o 11,7%. W tym przypadku wzmożony ruch również występował od marca, a wpływ na to miała przede wszystkim większa realizacja przewozów wewnątrz kraju oraz transport z portów morskich. Dla pracy eksploatacyjnej 2022 rok był drugim najlepszym w przeciągu ostatnich 10 lat, gdzie wykonano 87 mld (poc.-km). Lepszym pod tym względem jest jedynie rok 2018, gdy zrealizowano 88 mld poc.-km. W przypadku średniej odległości transportowanej 1 tony ładunku rok 2022 charakteryzował się największą wartością na przestrzeni ostatnich lat tj. 248,6 km, gdzie średnie roczne wartości w zestawieniu zawierały się najczęściej między 220 a 240 km. Wpływ na znacznie zwiększoną wartość opisywanego parametru miało nie tylko zwiększone zapotrzebowanie na realizację przewozów, ale również realizowane w całym kraju naprawy i remonty linii kolejowych.

Rozwój kolejowych przewozów towarowych w Polsce, w przeciwieństwie do transportu pasażerskiego, odznacza się większą stabilnością. Przykładem może być wybuch pandemii, gdzie w 2020 roku widoczne było drastyczne zmniejszenie się liczby przewożonych pasażerów (spadek nawet o 75%). Dla transportu towarowego w tym czasie również odnotowano spadek przewożonej masy ładunków, jednak wartości te są nieporównywalnie mniejsze. Spadki odnotowane względem roku poprzedniego wyniosły bowiem -5,6%.

Ze względu na rodzaj, przewożone towary można podzielić na następujące grupy:

- węgiel kamienny i brunatny, ropa, gaz,
- rudy metali, produkty górnictwa,
- koks, brykiety, produkty rafinacji naftowej,
- chemikalia, produkty chemiczne,
- metale, wyroby metalowe,
- pozostałe grupy wg klasyfikacji NST.

Na rysunku 2.8 przedstawiono zestawienie masowe najważniejszych grup towarów transportowanych za pomocą kolei na przestrzeni lat 2019-2022 w Polsce. Najważniejszymi dwoma grupami towarów, które odpowiadają za większość udziałów w rynku towarowym, są zdecydowanie: „węgiel kamienny i brunatny, ropa, gaz”, a także „rudy metali, produkty górnictwa”. Udział tych dwóch grup w masie przewożonych ładunków odpowiadał kolejno za 35,2% i 26% całkowitej masy ładunków transportowanych za pomocą kolei w 2022 roku. Pozostałe grupy mają zdecydowanie mniejszy udział w rynku i stanowią około 12,4% dla „koks, brykiety, produkty rafinacji naftowej” (30,7 mln ton), 4% dla „chemikalia, produkty chemiczne” (10,1 mln ton), 4,4% dla „metale, wyroby metalowe” (11 mln ton) oraz 17,8% dla pozostałych grup (44,3 mln ton).

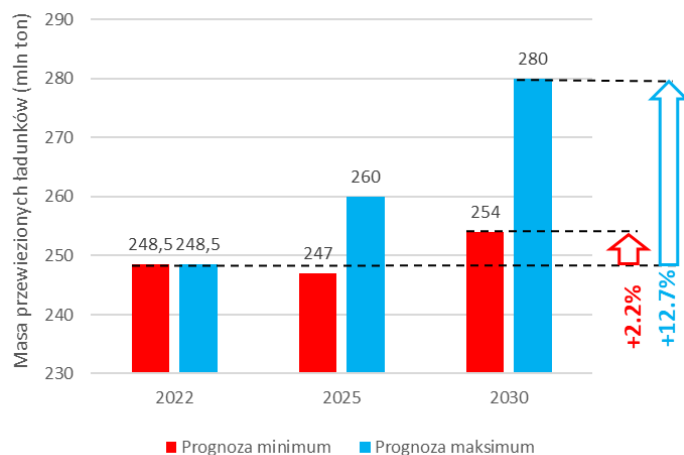


Rys. 2.8. Dane dotyczące masy przewiezionych grup towarów przez kolej w Polsce na przestrzeni lat 2019-2022 (na podstawie [37])

Przewozy towarowe są silnie uzależnione od wielu czynników, które bardzo często są trudne do przewidzenia. W przypadku zmniejszonego zapotrzebowania na energię w 2020 roku, przez zastój na rynku wywołany wybuchem pandemii, odnotowano między innymi ograniczenie w transporcie węgla. Jednocześnie w tym czasie zapotrzebowanie na transport środków medycznych wzrosło. Innym przykładem jest wybuch konfliktu na terenie Ukrainy, co spowodowało konieczność importu części surowców poprzez transport morski oraz zmniejszenie wykorzystania tzw. „Nowego Jedwabnego Szlaku”. Wiele czynników jest niezależnych od polityki państwa, przewoźników kolejowych oraz rynku, z tego względu dokument „Strategia Zrównoważonego Rozwoju Transportu do 2030 roku” [48] podaje dwa warianty – minimalny oraz maksymalny – prognozowanej masy przewożonych ładunków w Polsce w latach 2025 oraz 2030 (Rys. 2.9).

Według prognozy minimalnej do 2030 roku wzrost przewożonej masy ładunków może wzrosnąć o 2,2%, z lokalnym zmniejszeniem ilości przewożonych towarów w 2025 roku o -0,6%. Z kolei prognoza maksimum zakłada systematyczny wzrost przewożonej masy ładunków

do 260 mln ton w 2025 roku (+4,6%) i 280 mln ton w 2030 roku (+12,7%). Prognozy i rozwój transportu towarowego są ściśle powiązane z przyszłymi wydarzeniami politycznymi, inwestycjami na kolei, między innymi realizacją budowy Centralnego Portu Komunikacyjnego, czy chociażby koniecznością zwiększenia przewozów intermodalnych, szczególnie tranzytu na linii wschód-zachód. Ostatnie wydarzenia związane ze zmniejszeniem wykorzystania „Nowego Jedwabnego Szlaku”, który biegnie na terenie Białorusi i Rosji, czy chociażby polityka Unii Europejskiej, która zakłada redukcję wykorzystania nieodnawialnych surowców energetycznych oraz kruszyw, co wiąże się ze zmniejszeniem transportu tych ładunków, stawia pod znakiem zapytania realność zakładanych planów.



Rys. 2.9. Masa przewiezionych towarów w 2022 roku oraz prognozy według Strategii Zrównoważonego Rozwoju Transportu do 2030 roku w latach 2025 oraz 2030 (na podstawie [37,48])

## 2.3. Tabor kolejowy

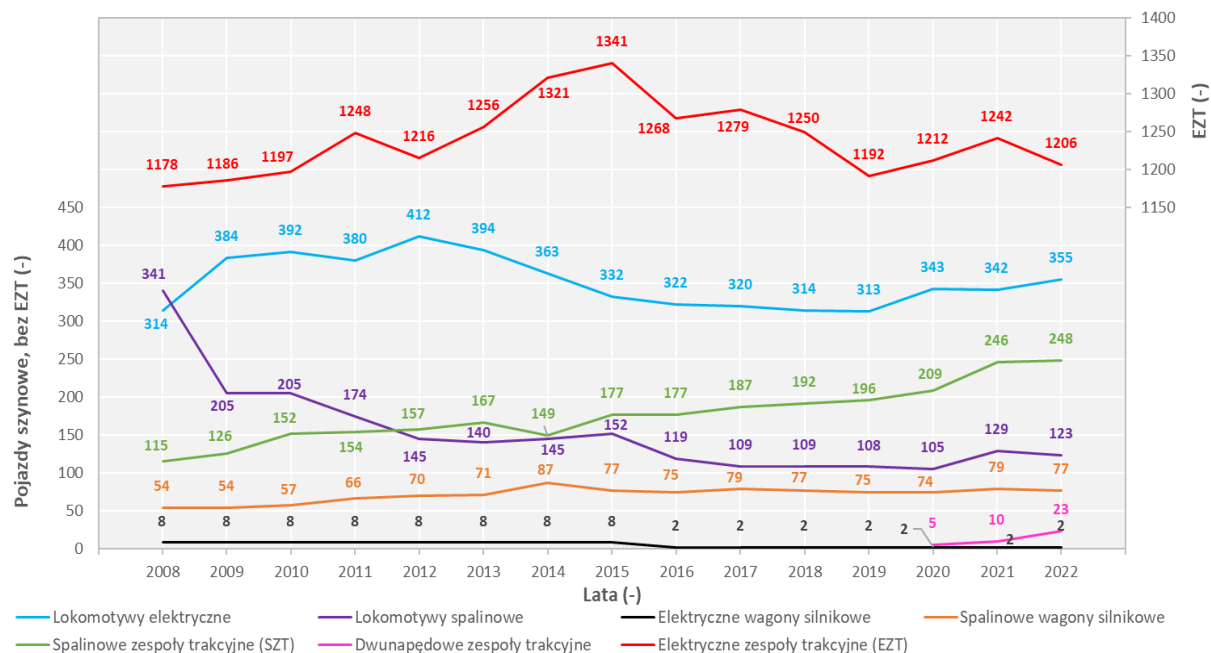
### 2.3.1. Pojazdy pasażerskie

Kolejowy transport pasażerski realizowany jest za pomocą trzech rodzajów pojazdów trakcyjnych: Zespoły Trakcyjne (ZT), lokomotywy oraz tak zwane wagony silnikowe. Ze względu na rodzaj napędu można podzielić te pojazdy na elektryczne, spalinowe oraz od 2020 roku dwunapędowe (napęd spalinowy oraz elektryczny). Biorąc pod uwagę ilostan trakcyjnego taboru pasażerskiego w Polsce w latach 2008-2022, oparty o dane Urzędu Transportu Kolejowego (Rys. 2.10), najliczniejszą grupą pojazdów są Elektryczne Zespoły Trakcyjne (EZT). W 2022 roku ich liczba wyniosła 1206 sztuk. Z kolei największa liczba tego rodzaju pojazdów, 1341 sztuk, była wykorzystywana w 2015 roku. Pośród EZT najpopularniejszą serią pojazdów, wykorzystywaną od 1961 roku w Polsce, jest EN57 lub jego modernizacje oraz pochodne (726 szt. w 2019 r.) [49]. Drugą najliczniejszą grupą w pasażerskich przewozach kolejowych są lokomotywy elektryczne (355 szt.), a ich liczba od 2019 roku wzrasta.

W przypadku pojazdów szynowych napędzanych trakcją spalinową, najliczniejszą grupą są Spalinowe Zespoły Trakcyjne (SZT) (248 szt.), których liczba na przestrzeni ostatnich 14 lat wzrosła dwukrotnie. Dla lokomotyw spalinowych w roku 2022 liczba pojazdów zwiększyła się o 18 pojazdów względem 2020 roku do 123 szt. (wzrost o 17%). Jednakże, jest to grupa pojazdów, która odnotowała największy spadek pod względem ilostanu od 2008 roku. Ich liczba z 341 szt. spadła do 105 szt. w 2020 roku, co oznacza ponad trzykrotną redukcję liczby tego rodzaju taboru. Najmniej liczną grupą kolejowych, trakcyjnych pojazdów pasażerskich w Polsce są wagony silnikowe, których w 2022 roku było w sumie 79 sztuk, w tym 77 napędzanych silnikiem spalinowym oraz 2 elektryczne.

Najnowszy w zestawieniu typ pojazdów, czyli Dwunapędowy Zespół Trakcyjny (DZT), pojawił się w Polsce na wyposażeniu przewoźników pasażerskich w 2020 roku w liczbie 5 sztuk. W 2021 roku liczba tych jednostek wzrosła do 10 sztuk, a w 2022 do 23 sztuk. Pojazdy te posiadają dwa rodzaje napędu – spalinowy (silnik spalinowy) oraz elektryczny (trakcja elektryczna). Dzięki takiemu rozwiązaniu pojazd może poruszać się zarówno po szlakach zelektryfikowanych jak i nieelektryfikowanych, co znacząco zwiększa jego uniwersalność i możliwości przejazdowe

po każdym rodzaju linii kolejowej. Hybrydowe Zespoły Trakcyjne IMPULS 2 typu 36WEh, główny przedstawiciel tej grupy pojazdów, zostały zamówione przez lokalnych przewoźników oraz Urzędy Marszałkowskie takie jak: Koleje Dolnośląskie (64%) [50], Urząd Marszałkowski Województwa Zachodniopomorskiego (63%) [51], Urząd Marszałkowski Województwa Podkarpackiego (38%) [52] (% - stopień zelektryfikowania linii kolejowej w województwie).

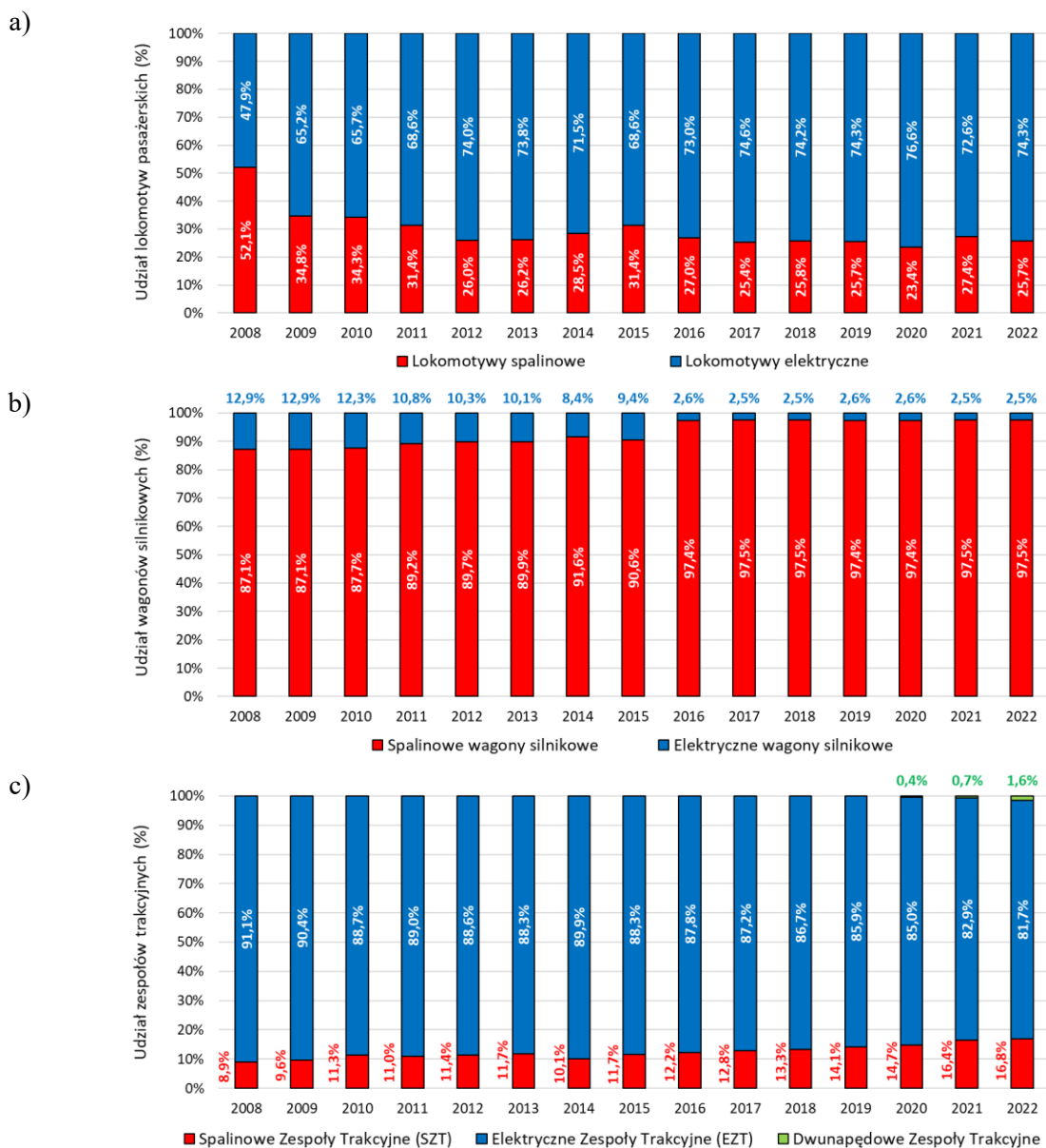


Rys. 2.10. Ilostan trakcyjnego taboru pasażerskiego w Polsce w latach 2008-2022 (na podstawie [37])

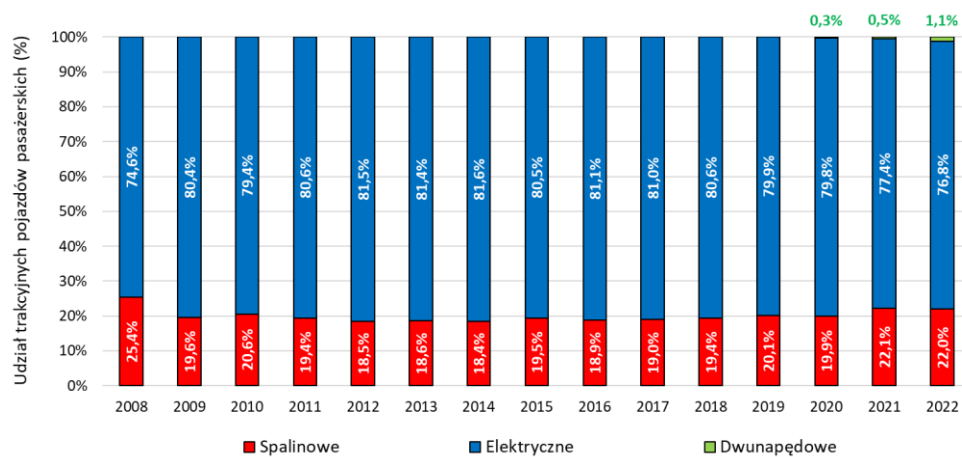
W celu możliwości analizy udziału rodzajów napędu w taborze pasażerskim w Polsce przedstawiony został rysunek 2.11. Lokomotywy elektryczne w Polsce stanowią większą część lokomotyw i w 2022 roku stanowiły 74,3% (Rys. 2.11a). Taki poziom utrzymuje się od około dekady. Lokomotywy z napędem spalinowym, w 2008 roku stanowiły połowę lokomotyw pasażerskich w kraju, jednak ze względu na redukcję ilostanu w ciągu zaledwie czterech lat ich udział obniżył się o połowę. W przypadku wagonów silnikowych dominujący udział stanowią pojazdy z napędem spalinowym (Rys. 2.11b). Dla tej grupy pojazdów widoczny jest ciągły trend wzrostowy na przestrzeni lat 2008-2022, od 87,1% do 97,5%. Pojazdy tego typu są wykorzystywane głównie na liniach niezelektryfikowanych, stąd potrzeba posiadania przez pojazd niezależnego źródła napędu.

Rozpatrując grupę Zespołów Trakcyjnych widoczne jest zwiększanie udziału napędów spalinowych (Rys. 2.11c). W przedstawionym przedziale czasowym udział pojazdów spalinowych wzrósł dwukrotnie z 8,9% do 16,8%, jednak wciąż jest to nieznaczny udział liczby ogólnej pojazdów, gdzie zdecydowaną większość stanowią pojazdy z napędem elektrycznym. Przyczyną zmniejszania się udziału pojazdów z napędem elektrycznym może być wycofywanie z eksploatacji pojazdów przestarzałych. Pojazdy dwunapędowe, pomimo małego udziału we flocie pojazdów pasażerskich (1,6% w 2022 r.), sukcesywnie, rok do roku, podwajają swój udział w rynku.

Podsumowując analizę podziału trakcyjnych pojazdów pasażerskich w Polsce ze względu na rodzaj napędu na przestrzeni lat 2008-2022 (Rys. 2.12) można stwierdzić, że zdecydowaną większość stanowiły pojazdy elektryczne (między 74,6-81,6%). Sytuacja ta wynika przede wszystkim z popularności Elektrycznych Zespołów Trakcyjnych, które stanowią większość rynkową, 59,3% wszystkich trakcyjnych pojazdów pasażerskich w 2022 roku. Od 2016 roku zaobserwować można systematyczne, coroczne obniżanie udziału napędów elektrycznych z 81,1% do 76,8%, jednak tempo zmian wydaje się być dość powolne. Pojazdy z silnikami spalinowymi, wliczając pojazdy dwunapędowe, w 2022 roku posiadały udział we flocie pojazdów pasażerskich na poziomie 23,1%, co było największym udziałem od 14 lat, jednak kolejowy transport pasażerski w Polsce jest zdominowany przez pojazdy z napędem elektrycznym.

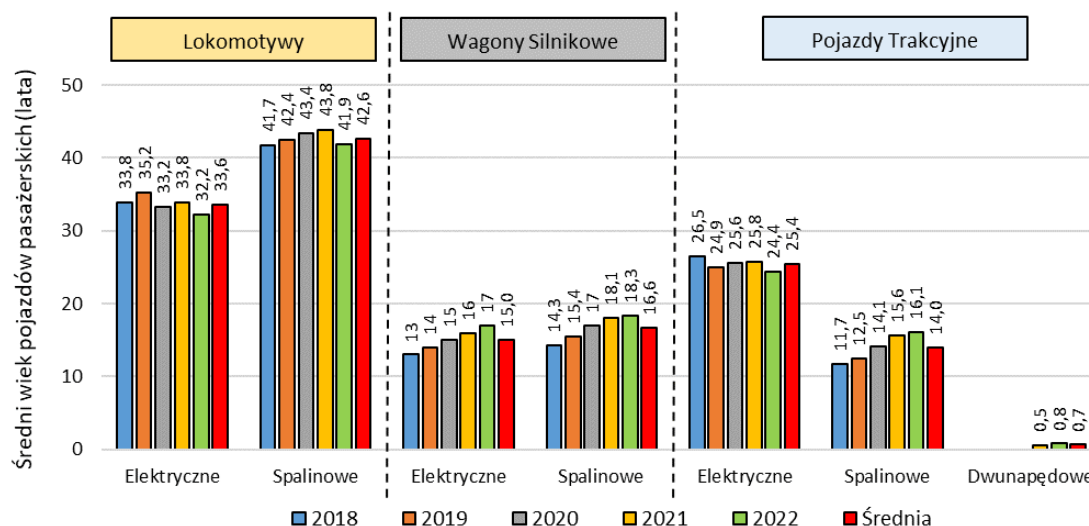


Rys. 2.11. Udział pasażerskich pojazdów trakcyjnych pod względem rodzaju napędu w Polsce w latach 2008-2022: a) lokomotyw, b) wagony silnikowe, c) zespoły trakcyjne (na podstawie [37])



Rys. 2.12. Udział pasażerskiej floty trakcyjnej pod względem rodzaju napędu w Polsce w latach 2008-2022 (na podstawie [37])

Jednym z istotnych wskaźników mówiącym o nowoczesności taboru jest wiek pojazdu (Rys. 2.13). Inwestycje w nowoczesny tabor kolejowy zahamowały wzrost średniego wieku niektórych grup pasażerskich pojazdów kolejowych eksploatowanych na polskiej sieci kolejowej. W przypadku lokomotyw spalinowych oraz elektrycznych, a także EZT zaobserwować można obniżenie średniego wieku pojazdów. Pomimo działań, których wynikiem jest zmniejszenie średniego wieku pojazdów, należy mieć jednak na uwadze, że dotyczy on najstarszych grup pojazdów, gdzie wiek dla wspomnianych pojazdów przekracza ponad 20 lat i więcej. Najstarszą grupą pojazdów są lokomotywy, z czego te napędzane trakcją spalinową są zdecydowanie na pierwszym miejscu pod względem średniej wieku (w 2022 r. - 41,9 lat). Oznacza to, że statystycznie dla tych pojazdów rok produkcji przypada na 1981 rok. Działania właścicieli taboru pozwoliły na odmłodzenie tej grupy pojazdów względem roku 2021 o niemal 2 lata (z 43,8 lat), jednak w dalszym ciągu wskaźnik ten jest znaczny. Lokomotywy elektryczne średnio są niemal o dekadę młodsze w porównaniu do lokomotyw spalinowych, a ich średnia wieku na przestrzeni ostatnich 5 lat była najniższa w 2022 r. (32,2 lat). W grupie tej znajduje się najstarszy czynnie eksploatowany pojazd trakcyjny w ruchu pasażerskim tj. lokomotywa EP05 wyprodukowana w 1961 roku (61 lat). Obniżenie średniej wieku lokomotyw pasażerskich następowało przy jednoczesnym wzroście ich liczby na przestrzeni ostatnich lat. Oznacza to, że do floty wprowadzane były młodsze niż średnia wieku lub nowe pojazdy.

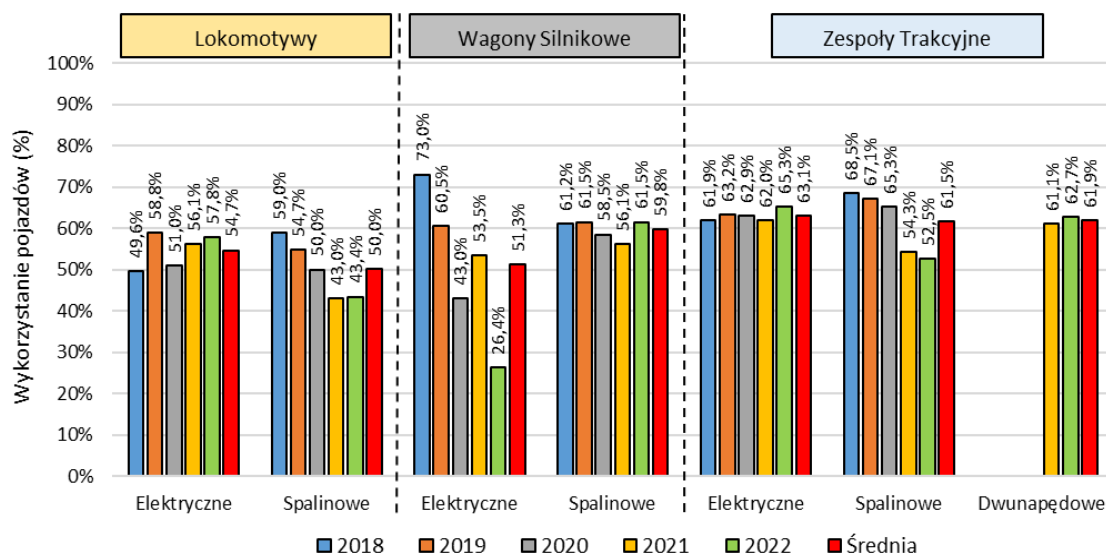


Rys. 2.13. Średni wiek trakcyjnego pasażerskiego taboru kolejowego w Polsce w latach 2018–2022 (na podstawie [37])

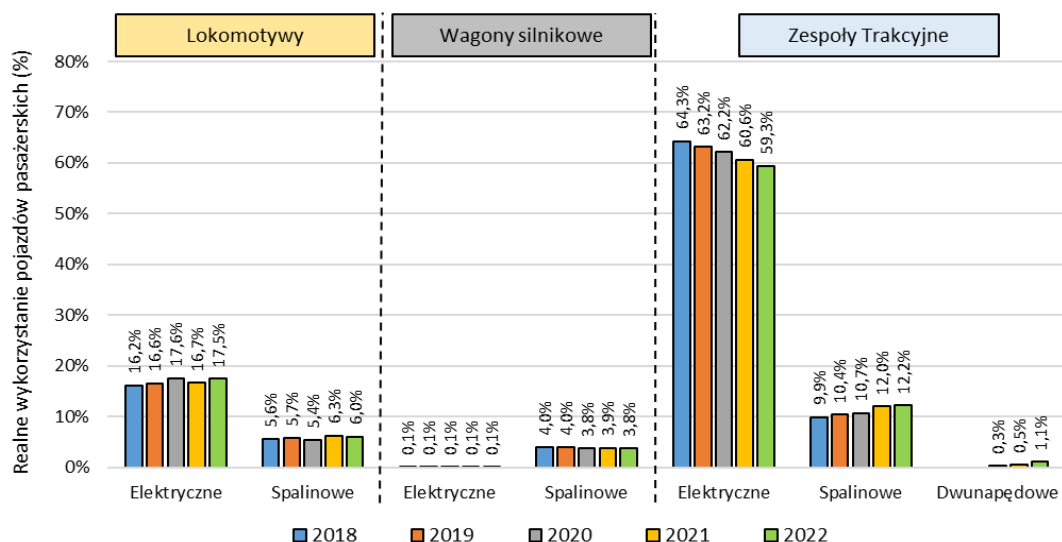
W przypadku najliczniejszej w Polsce grupy pojazdów EZT, w 2022 r. obniżyła się ich średnia wieku do 24,4 lat z 25,8 w 2021 roku, a w ciągu ostatnich 5 lat wartość ta obniżyła się niemal o 2 lata. Za taki stan odpowiada głównie likwidacja wyeksploatowanych pojazdów EN57, których liczba sukcesywnie maleje. Dodatkowo wprowadzane są do służby pojazdy fabrycznie nowe. W przypadku SZT średnia wieku w 2022 r. wynosiła 16,1 lat i z roku na rok rośnie. W grupie zespołów trakcyjnych znajduje się najmłodszy przedstawiciel trakcyjnych pojazdów pasażerskich tj. Dwunapędowe Zespoły Trakcyjne ze średnią wieku 0,7 lat. Wprowadzane od 3 lat na polski rynek pojazdy z dwoma źródłami napędu są nowoczesnymi i technicznie zaawansowanymi fabrycznie nowymi pojazdami, z tego powodu są średnio najmłodszy w taborze pasażerskim. W przypadku wagonów silnikowych zarówno spalinowych jak i elektrycznych widoczna jest tendencja rosnącego średniego wieku. Dla obu rodzajów napędu średnia wieku jest zbliżona i w roku 2022 wynosiła 17 lat dla pojazdu elektrycznego oraz 18,3 dla spalinowego.

Jednym z istotnych wskaźników w przypadku pojazdów szynowych jest współczynnik wykorzystania taboru. Obliczany jest on na podstawie dzielenia sumy dobowej liczby pojazdów znajdujących się w dyspozycji przewoźnika w ciągu roku przez liczbę dni kalendarzowych. Wskaźnik ten mówi zatem w głównej mierze o stanie technicznym pojazdu. To z kolei może mieć bezpośrednie powiązanie z wiekiem pojazdu, gdzie pojazdy starsze - ze względu na znaczny stopień wyeksploatowania - mogą ulegać częstszym wyłączeniom z eksploatacji z powodu uszkodzeń.

Na przestrzeni ostatnich 5 lat, największy współczynnik 73% został odnotowany w 2018 roku i dotyczył elektrycznych wagonów silnikowych (Rys. 2.14). Z kolei najniższa wartość dotyczyła również tego samego rodzaju pojazdów i wyniosła 26,4% w 2022 roku. W przypadku roku 2022, większość grup pojazdów osiągnęła współczynnik większy niż 50%. Najniższy współczynnik, zaraz po elektrycznych wagonach silnikowych, osiągnęły lokomotywy spalinowe 43,4% oraz SZT 52,5%. Pojazdami o najbardziej stałym przebiegu opisywanego wskaźnika na przestrzeni ostatnich lat były spalinowe wagony silnikowe (około 59,8%), dwunapędowe zespoły trakcyjne (61,9%) oraz EZT (63,5%). Te ostatnie odznaczały się największą średnią na przestrzeni ostatnich lat, a także znacząco zwiększono wynik do 65,3% w 2022 roku (62% w 2021 r.) głównie poprzez likwidowanie wyeksploatowanych pojazdów serii EN57.



Rys. 2.14. Średnie wykorzystanie trakcyjnego taboru kolejowego przez przewoźników pasażerskich w Polsce w latach 2018–2022 (na podstawie [37])



Rys. 2.15. Realne wykorzystanie ogólnej liczby trakcyjnego taboru kolejowego w danym roku przez przewoźników pasażerskich w Polsce po uwzględnieniu ilostanu oraz średniego stopnia wykorzystania pojazdów w latach 2018–2022 (na podstawie [37])

Biorąc pod uwagę liczbę pasażerskich pojazdów trakcyjnych w Polsce oraz współczynnik ich wykorzystania, obliczono średni udział danego rodzaju pojazdów dostępnych do służby w danym roku w latach 2018-2022 (Rys. 2.15). Największy udział dostępnych pojazdów zdecydowanie

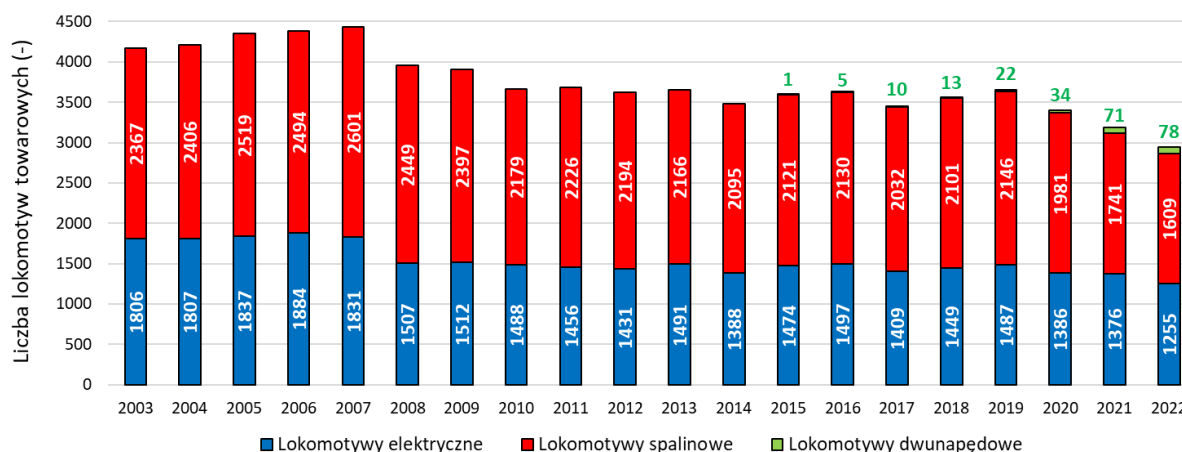
stanowiły EZT. Wskaźnik ten z roku na rok jednak maleje (z 64,3% w 2018 r. do 59,3% w 2022 r.). Kolejne grupy stanowiły lokomotywy elektryczne (16,2-17,5%) oraz SZT (9,9-12,2%). Lokomotywy spalinowe stanowiły pomiędzy 5,4%-6,3%, a spalinowe wagony silnikowe 3,8-4%. Dla elektrycznych wagonów silnikowych udział ten był symboliczny, około 0,1%. Taka sama sytuacja dotyczy dwunapędowych zespołów trakcyjnych, gdzie dostępne pojazdy stanowiły od 0,3% do 1,1%. Należy jednak zaznaczyć, że z roku na rok udział ten się podwaja.

### 2.3.2. Pojazdy towarowe

Do kolejowego transportu towarowego jako pojazdy trakcyjne, w odróżnieniu do transportu pasażerskiego, wykorzystuje się jedynie lokomotywy. Ze względu na napęd można podzielić je na elektryczne, spalinowe oraz wdrażane od 2015 roku dwunapędowe (Rys. 2.16). W Polsce na przestrzeni lat 2003-2022 największą liczbę lokomotyw towarowych, 4432 szt., odnotowano w 2007 roku. W tym czasie na ilostan taboru składały się 1831 szt. lokomotyw elektrycznych oraz 2601 szt. lokomotyw spalinowych. Był to również rok, w którym odnotowano największą liczbę lokomotyw spalinowych w rozpatrywanym przedziale lat 2003-2022.

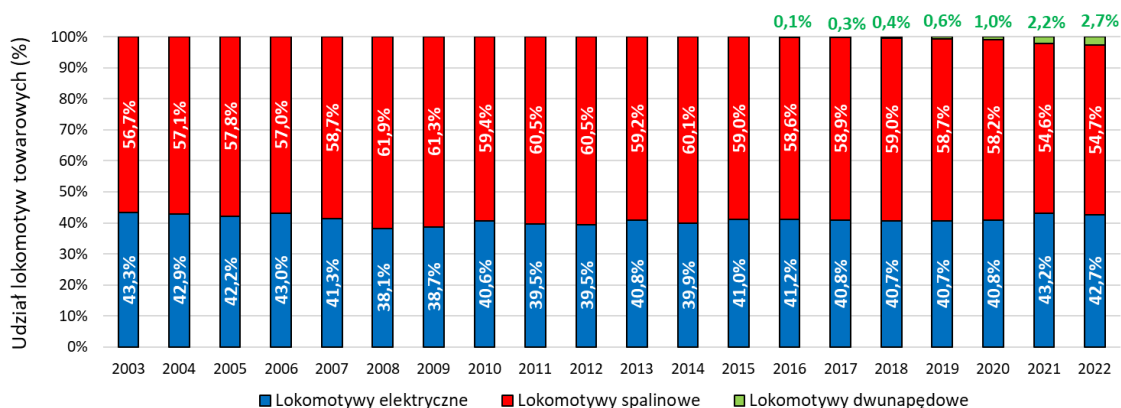
Od 2007 roku w ciągu 15 lat ogólna liczba lokomotyw zmniejszyła się o ponad 33% do 2942 szt. w 2022 roku, liczby niewiele większej od liczby samych lokomotyw spalinowych z 2007 roku. Należy przy tym podkreślić największą redukcję rok do roku, która wystąpiła między latami 2008-2007 i wyniosła 10,7%. Rok 2022 był pierwszym, w którym ilostan lokomotyw towarowych był mniejszy niż 3000 szt. Dodatkowo, względem roku poprzedniego odnotowano drugą największą zmianę rok do roku w ilostanie taboru o wartość 7,7% (zmniejszenie stanu o 246 pojazdów). Zarówno lokomotywy elektryczne (1255 szt.) jak i spalinowe (1609 szt.) w 2022 roku osiągnęły najniższy ilostan na przestrzeni analizowanych lat.

Jedyną grupą pojazdów, która od czasu wprowadzenia ich do eksploatacji z roku na rok powiększa swój ilostan, są lokomotywy dwunapędowe. Aktualnie eksploatowanych jest 78 sztuk pojazdów z dwoma źródłami napędu, a rozpatrując ich coroczny przyrost można już w tym przypadku mówić o trendzie wzrostowym. Przewoźnicy towarowi zauważają zalety jakie niesie ze sobą posiadanie pojazdów przystosowanych do poruszania się zarówno po liniach zelektryfikowanych jak i niezelektryfikowanych [53]. Pojazd taki może być również wykorzystywany na bocznicach kolejowych, co czyni go uniwersalnym. Z tego powodu, w następnych latach można spodziewać się dalszego wzrostu ilostanu pojazdu z tym rodzajem napędu.



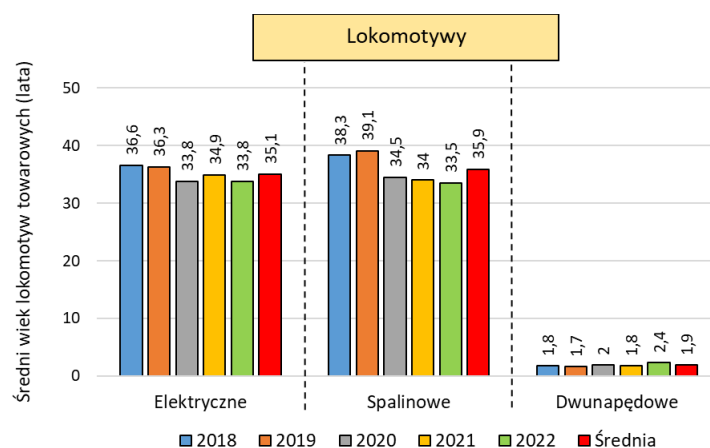
Rys. 2.16. Ilostan lokomotyw towarowych w Polsce w latach 2003-2022 (na podstawie [37])

Biorąc pod uwagę udział rodzaju napędu w lokomotywach towarowych na przestrzeni ostatnich dwóch dekad można zauważyć, że większość stanowiły pojazdy z napędem spalinowym (Rys. 2.17). Ich udział zawierał się pomiędzy 54,6% w 2021 r., a 61,9% w 2008 roku. W przypadku lokomotyw elektrycznych ich udział na przestrzeni ostatnich lat zawierał się pomiędzy 38,1% w 2008 roku, a 43,3% w 2003 roku. Coraz bardziej popularne lokomotywy dwunapędowe stanowią jak na razie minimalny udział w taborze towarowym, jednak z poziomu 0,1% w 2016 roku osiągnęły poziom 2,7% w 2022 roku.



Rys. 2.17. Udział lokomotyw towarowych pod względem rodzaju napędu w Polsce w latach 2003-2022 (na podstawie [37])

Analizując średnią wieku lokomotyw towarowych w Polsce (Rys. 2.18), można stwierdzić, że wiek zarówno pojazdów elektrycznych jak i spalinowych w 2022 roku był na zbliżonym poziomie. Wskaźnik ten dla lokomotyw elektrycznych wyniósł 33,8 lat, a dla spalinowych 33,5 lat. W obu przypadkach widoczne jest systematyczne odmładzanie taboru. Pojazdy elektryczne jeszcze w 2018 roku cechowały się średnią wieku na poziomie 36,6 lat, a spalinowe w 2019 roku 39,1 lat. Oznacza to obniżenie średniej wieku dla opisywanych grup pojazdów kolejno o 2,8 i 5,6 lat. Zjawisko to związane jest przede wszystkim z możliwością dzierżawy wyspecjalizowanego taboru kolejowego. Dodatkowo, w tym czasie realizowane były inwestycje subsydiowane pochodzące ze środków UE. Przewoźnicy likwidowali również ze służby wyeksploatowany tabor kolejowy. Wszystko powyższe wpłynęło na zmniejszenie ilostanu pojazdów towarowych przy jednoczesnym zmniejszeniu ich średniej wieku. Ważnym zaznaczenia jest jednak fakt, iż w eksploatacji w dalszym ciągu znajdują się wiekowe pojazdy, z których najstarszym egzemplarzem jest lokomotywa elektryczna serii 140 wyprodukowana w 1957 roku (65 lat w 2022 roku).

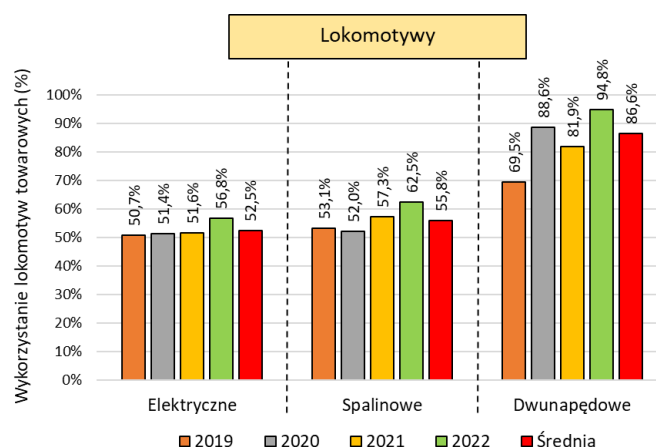


Rys. 2.18. Średni wiek lokomotyw towarowych w Polsce w latach 2018–2022 (na podstawie [37])

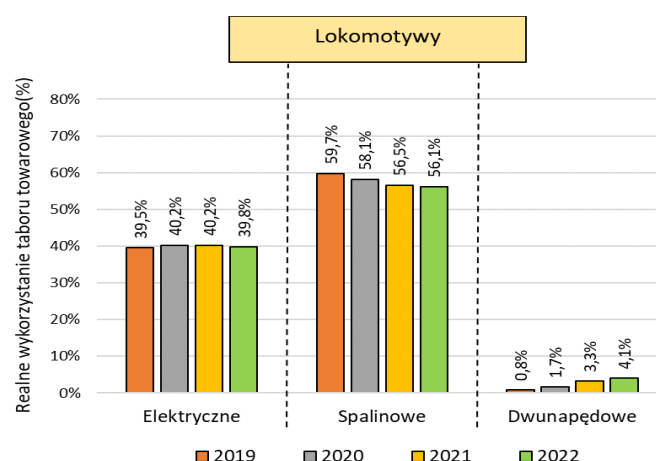
Grupą odznaczającą się najmniejszą średnią wieku są pojazdy dwunapędowe, które dopiero od 2015 roku są wykorzystywane przez przewoźników. Coroczne wprowadzanie do eksploatacji fabrycznie nowych pojazdów takich jak lokomotywy typu 111Ed spowodowało utrzymanie średniej wieku pomiędzy 1,7 a 2,4 lat na przestrzeni lat 2018-2022. W porównaniu do pozostałych grup pojazdów oznacza to ogromną różnicę wiekową. Uniwersalne pojazdy dwunapędowe zdecydowanie będą istotnym przedmiotem inwestycji w przyszłości, co prawdopodobnie wpłynie na dalsze utrzymywanie się średniego wieku na niskim poziomie.

Średnia wieku zdecydowanie przełożyła się na wykorzystanie lokomotyw towarowych (Rys. 2.19). Pojazdy dwunapędowe, czyli o najmniejszej średniej wieku, w 2022 roku osiągnęły najwyższy poziom dostępności z całego zestawienia na poziomie 94,8%. Oznacza to, że lokomotywy te w 2022 roku nie

były dostępne do użytku średnio przez zaledwie 19 dni w roku. Z kolei średnia ważona wykorzystania lokomotyw dwunapędowych za ostatnie cztery lata wyniosła 86,6%. Pomimo najwyższego wskaźnika spośród wszystkich grup pojazdów, średnia za lata 2019-2022 mogłaby być wyższa, gdyby nie relatywnie niski wynik z 2019 roku (69,5%). W przypadku lokomotyw elektrycznych oraz spalinowych wykorzystanie taboru w każdym roku przekraczało 50%. Widoczny jest wpływ inwestycji i działań mających na celu wyłączanie z użytku wyeksploatowanych oraz zakup nowych pojazdów w ostatnich latach. Z tego powodu w 2022 roku średnie wykorzystanie lokomotyw elektrycznych (56,8%) i spalinowych (62,5%) wzrosło o 5,2 punktu procentowego względem poprzedniego roku.



Rys. 2.19. Średnie wykorzystanie lokomotyw towarowych przez przewoźników towarowych w Polsce w latach 2019–2022 (na podstawie [37])



Rys. 2.20. Wykorzystanie ogólnej liczby lokomotyw przez przewoźników towarowych w Polsce po uwzględnieniu ilostanu oraz średniego stopnia wykorzystania pojazdów w latach 2019–2022 (na podstawie [37])

Biorąc pod uwagę ilostan danej grupy pojazdów oraz ich roczny stopień wykorzystania obliczony został stopień wykorzystania danej grupy pojazdów w odniesieniu do całkowitego ilostanu taboru towarowego w latach 2019-2022 (Rys. 2.20). W przypadku lokomotyw elektrycznych wskaźnik ten był mniej więcej na stałym poziomie i wynosił od 39,5% do 40,2%. Lokomotywy spalinowe posiadały największy udział, jednak widoczny jest systematyczny spadek z 59,7% w 2019 roku do 56,1% w 2022 roku. W miejsce obniżonego średniego rocznego udziału wykorzystania lokomotyw spalinowych zaczęto włączać pojazdy dwunapędowe. Ich wysoki stopień wykorzystania oraz rosnąca liczba wpłynęły na stale zwiększający się udział. Jednakże ze względu na małą liczbę pojazdów w porównaniu do pozostałych lokomotyw ich udział wykorzystania przy całkowitej liczbie pojazdów wyniósł w 2022 roku 4,1%.

### 2.3.3. Pojazdy specjalne

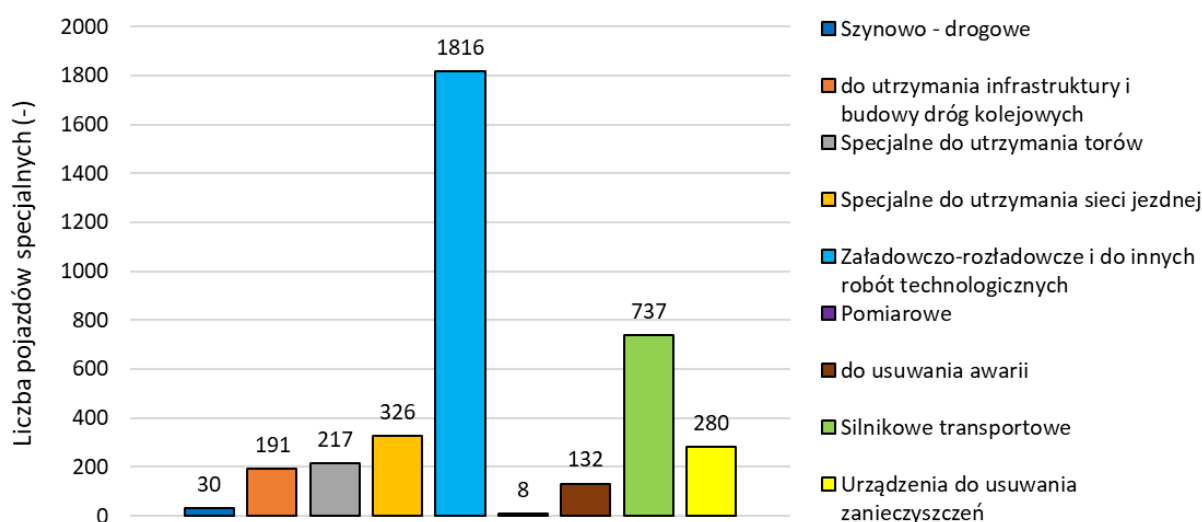
Prawidłowe funkcjonowanie transportu kolejowego opiera się na dobrze rozwiniętej infrastrukturze kolejowej, która powinna być utrzymywana na odpowiednio wysokim poziomie. Działania takie jak naprawa, utrzymanie lub budowa infrastruktury kolejowej są realizowane za pomocą szynowych pojazdów specjalnych [54]. Pojazdy te, pomimo małej rozpoznawalności, są bardzo liczną grupą kolejowego taboru w Polsce. W 2021 roku ich liczba wyniosła w sumie 3737 sztuk [55]. Oznacza to, że grupa ta była w 2021 roku liczniejsza od lokomotyw towarowych o 17% (3188 szt.) oraz od trakcyjnych pojazdów pasażerskich o 82% (2050 szt.).

Pojazdy specjalne można podzielić na 10 podstawowych podgrup takich jak:

- Pojazdy szynowo-drogowe,
- Pojazdy do utrzymania infrastruktury i budowy dróg kolejowych,
- Kolejowe pojazdy specjalne do utrzymania torów,
- Kolejowe pojazdy specjalne do utrzymania sieci jezdnej,
- Pojazdy załadowczo-rozładowcze i do innych robót technologicznych,
- Specjalne pojazdy pomiarowe,
- Pojazdy do usuwania awarii,
- Silnikowe pojazdy transportowe,
- Urządzenia do usuwania zanieczyszczeń
- Kolejowe pojazdy specjalne do utrzymania i robót budowlanych.

Przy czym liczebność ostatniej grupy wynosiła zero.

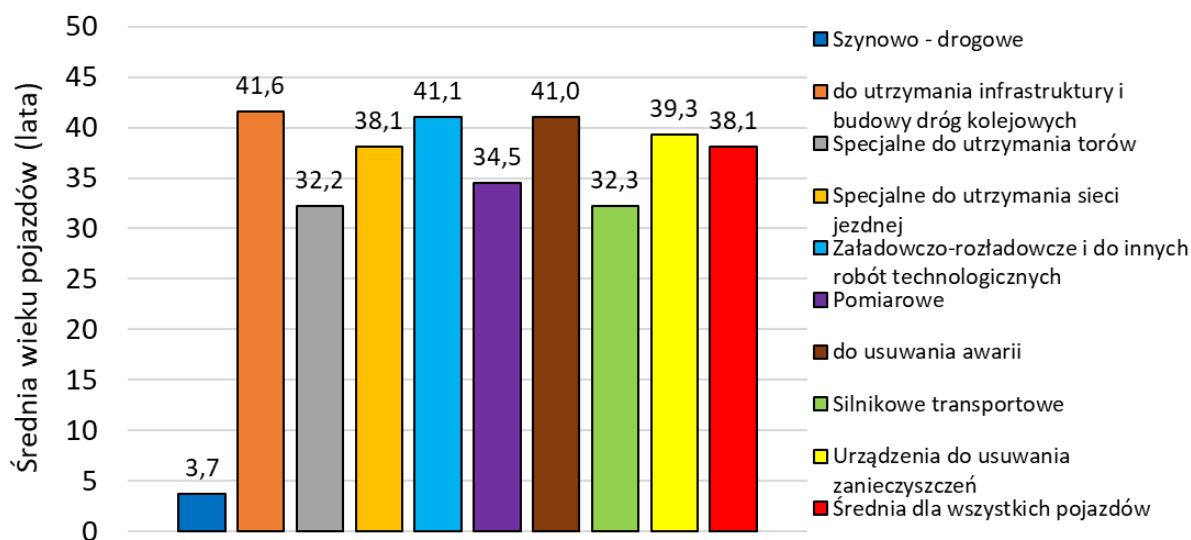
Na rysunku 2.21. przedstawiono zestawienie liczby pojazdów specjalnych z uwzględnieniem ich podziału na podgrupy. Zdecydowanie najliczniejszą podgrupą, stanowiącą niemal połowę łożyska pojazdów specjalnych (48,6%), są pojazdy sklasyfikowane jako „załadowczo-rozładowcze i do innych robót technologicznych”, których było zarejestrowanych 1816 sztuk. Pojazdy te są przystosowane do załadunku i rozładunku towarów i służą przede wszystkim do przewozu: szyn, materiałów sypkich, podkładów, rozjazdów. Drugą grupą, stanowiącą 19,8% pojazdów specjalnych, są silnikowe pojazdy transportowe, których było 737 sztuk. Na tę grupę pojazdów składają się między innymi pojazdy trakcyjne, drezyny lub wagony silnikowe oraz drezyny transportowe. Pozostałe podgrupy pojazdów, według liczby, to kolejowe pojazdy specjalne do utrzymania sieci jezdnej (326 szt.), urządzenia do usuwania zanieczyszczeń (280 szt.), kolejowe pojazdy specjalne do utrzymania torów (217 szt.). W przypadku pozostałych podgrup pojazdów, ich łożyska jest mniejszy niż 200 sztuk.



Rys. 2.21. Łożyska kolejowych pojazdów specjalnych w Polsce w 2021 roku (na podstawie [55,56])

Średnia wieku pojazdów specjalnych dla poszczególnych grup została przedstawiona na rysunku 2.22. Widoczne jest, że pojazdy specjalne odznaczają się znaczną średnią wieku, która dla wszystkich pojazdów łącznie wynosiła 38,1 lat. Wyjątek stanowią jedynie pojazdy szynowo-drogowe, których średnia wieku wynosiła 3,7 lat. Wynika to przede wszystkim z tego, że pojazdy tego

typu są względnie nowym rozwiązaniem na rynku i dopiero od stosunkowo niedawna są wprowadzane do eksploatacji przez przedsiębiorstwa [57]. W przypadku pozostałych pojazdów, aż trzy podgrupy odznaczały się średnią wieku powyżej 40 lat. Należały do nich najstarsze w zestawieniu pojazdy do utrzymania infrastruktury i budowy dróg kolejowych (41,6 lat), najliczniejsze pojazdy załadowczo-rozładowcze i do innych robót technologicznych (41,1 lat) oraz pojazdy do usuwania awarii sieci trakcyjnej (41 lat). Pozostałe podgrupy pojazdów, z wyłączeniem pojazdów szynowo-drogowych, również odznaczały się zaawansowaną średnią wieku, gdzie najmłodszą grupą były kolejowe pojazdy specjalne do utrzymania torów (32,2 lata) oraz silnikowe pojazdy transportowe (32,3 lata). Oznacza to, że średni przedział wiekowy dla opisywanych grup zawierał się pomiędzy 32, a 42 lata.

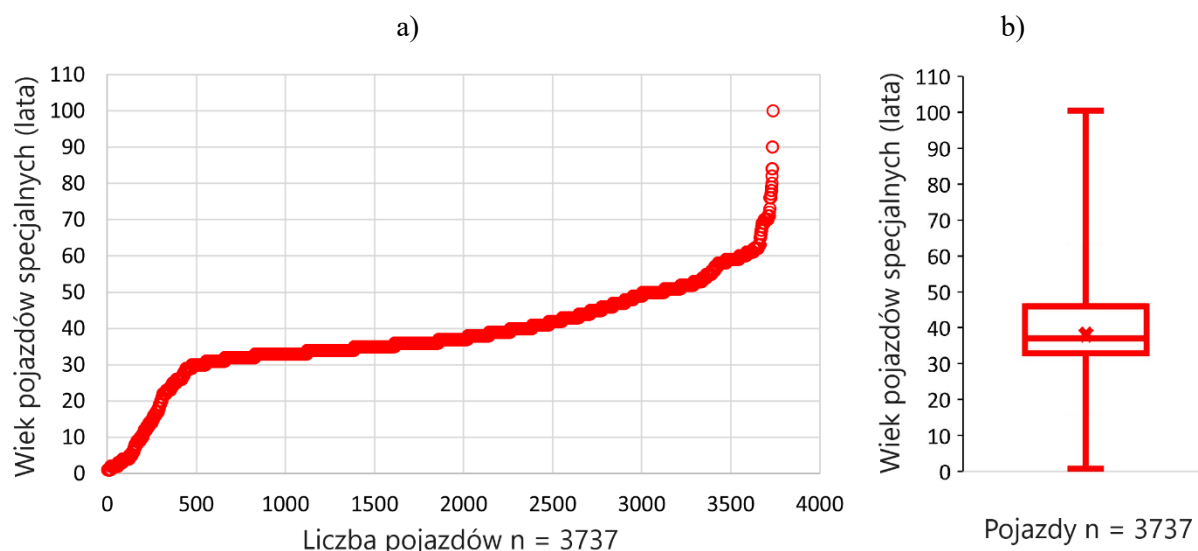


Rys. 2.22. Średnia wieku kolejowych pojazdów specjalnych w Polsce w 2021 roku (na podstawie [55,56])

Należy mieć na uwadze, że są to wartości średnie, co oznacza, że wpływ na ten wskaźnik mają również pojazdy bardzo zaawansowane wiekowo, które znajdują się w zestawieniu. Przykładem są pojazdy wyprodukowane nawet w latach 30 i 40 XX wieku, a najstarszym przedstawicielem jest 100-letni pojazd do utrzymania sieci jezdnej, wyprodukowany w 1921 roku (Rys. 2.23a). Pomimo bardzo zaawansowanych wiekowo pojazdów w zestawieniu, posiadają one jednak nadany numer EVN (European Vehicle Number), niezbędny do poruszania się po linii kolejowej. Należy pamiętać, że liczba tak wiekowych pojazdów jest względnie mała, co oznacza, że nie mają one znacznego wpływu na ocenę ogólnego wieku pojazdów zarówno w ujęciu całłościowym jak i w odniesieniu do poszczególnych podgrup. Realny wpływ na tę wartość mają pojazdy, w wieku od 30 do 50 lat. Potwierdza to rysunek 2.23b, gdzie pojazdy zawierają się najliczniej w drugim i trzecim kwartylu ogólnego zestawienia pojazdów specjalnych tj. w wieku między 33 a 46 lat. Z kolei mediana wieku dla pojazdów specjalnych wyniosła 37 lat. Odzwierciedlenie tych wartości można znaleźć również w średnim wieku danych podgrup pojazdów specjalnych (Rys. 2.22). W tabeli 2.1. przedstawione zostało dokładne zestawienie ilostanu oraz średniego wieku danych podtypów pojazdów specjalnych w Polsce w 2021 roku.

Tab. 2.1. Charakterystyka łożostanu oraz średniego wieku danego podtypu pojazdów specjalnych w Polsce w 2021 roku (na podstawie [55,56])

| Typ pojazdu                                                       | Ilość taboru (szt.) | Średni wiek (lata) | Podtyp pojazdu                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pojazdy szynowo-drogowe                                           | 2                   | 14,5               | Pozostałe                                                                                |
|                                                                   | 11                  | 3,1                | Pojazd szynowo-drogowy kategorii 1                                                       |
|                                                                   | 17                  | 2,9                | Pojazd szynowo-drogowy kategorii 2                                                       |
| Pojazdy do utrzymania infrastruktury i budowy dróg kolejowych     | 81                  | 51,0               | Pozostałe                                                                                |
|                                                                   | 6                   | 41,5               | Dźwigi ułładkowe                                                                         |
|                                                                   | 4                   | 26,8               | Pociąg do wymiany toru                                                                   |
|                                                                   | 30                  | 31,9               | Oczyszczarka tłucznia w torze                                                            |
|                                                                   | 17                  | 31,3               | Maszyny do robót ziemnych                                                                |
|                                                                   | 53                  | 37,1               | Żuraw kolejowy (z wyjątkiem wykolejeń)                                                   |
| Kolejowe pojazdy specjalne do utrzymania torów                    | 19                  | 33,2               | Pozostałe                                                                                |
|                                                                   | 39                  | 33,5               | Wysokowydajna podbijarka toru                                                            |
|                                                                   | 15                  | 34,7               | Inne rodzaje maszyn do podbijania toru                                                   |
|                                                                   | 57                  | 33,4               | Podbijarka rozjazdów i przejazdów kolejowych                                             |
|                                                                   | 61                  | 30,6               | Profilarka podsypki                                                                      |
|                                                                   | 11                  | 24,3               | Dynamiczny stabilizator toru                                                             |
|                                                                   | 15                  | 33,5               | Maszyny do szlifowania lub maszyny do zgrzewania szyn                                    |
|                                                                   | 211                 | 48,0               | Pozostałe                                                                                |
| Kolejowe pojazdy specjalne do utrzymania sieci jezdnej            | 108                 | 18,9               | Maszyna wieloczynnościowa                                                                |
|                                                                   | 1                   | 49,0               | Maszyna do bębnow z przewodami                                                           |
|                                                                   | 3                   | 8,7                | Maszyna do ustawiania słupów trakcyjnych                                                 |
|                                                                   | 1                   | 13,0               | Maszyna z podnoszoną platformą, maszyna z                                                |
|                                                                   | 2                   | 70,0               | Wagon do kontroli sieci trakcyjnej                                                       |
|                                                                   | 572                 | 50,9               | Pozostałe (w tym pojazdy techniczno-gospodarcze)                                         |
| Pojazdy załadowczo-rozładowcze i do innych robót technologicznych | 155                 | 19,0               | Transporter (wagon) samowyładowczy do transportu podsypki, żwiru itp. materiałów sypkich |
|                                                                   | 300                 | 48,1               | Wagon załadowczo-rozładowczy do transportu                                               |
|                                                                   | 12                  | 1,8                | Wagon załadowczo-rozładowczy do transportu rozjazdów (wraz z układami sterowniczymi i    |
|                                                                   | 777                 | 36,2               | Wagon załadowczo-rozładowczy do transportu innych materiałów                             |
|                                                                   | 2                   | 13,0               | Pozostałe                                                                                |
| Specjalne pojazdy pomiarowe                                       | 3                   | 44,3               | Wagon do pomiaru toru                                                                    |
|                                                                   | 1                   | 46,0               | Wagon do pomiaru sieci trakcyjnej                                                        |
|                                                                   | 2                   | 35,5               | Drezyna do pomiaru geometrii toru                                                        |
|                                                                   | 15                  | 12,7               | Pozostałe                                                                                |
| Pojazdy do usuwania awarii                                        | 38                  | 40,8               | Żuraw do usuwania skutków wypadków kolejowych                                            |
|                                                                   | 66                  | 45,8               | Wagon ratowniczy                                                                         |
|                                                                   | 13                  | 50,5               | Wagon do przewozu sprzętu ratowniczego                                                   |
|                                                                   | 2                   | 31,0               | Pozostałe                                                                                |
| Silnikowe pojazdy transportowe                                    | 1                   | 12,0               | Pojazd trakcyjny                                                                         |
|                                                                   | 702                 | 32,2               | Drezyna transportowa (oprócz 59)                                                         |
|                                                                   | 32                  | 33,3               | Drezyna lub wagon silnikowy                                                              |
|                                                                   | 80                  | 37,3               | Pozostałe                                                                                |
| Urządzenia do usuwania zanieczyszczeń                             | 74                  | 39,6               | Pług odśnieżny bez napędu                                                                |
|                                                                   | 109                 | 40,8               | Odśnieżarka toru                                                                         |
|                                                                   | 17                  | 38,2               | Pojazd lub maszyna do odchwaszczania torów                                               |
|                                                                   | 3737                | 38,1               | Suma/Średni wiek                                                                         |



Rys. 2.23. Charakterystyka wszystkich pojazdów specjalnych w Polsce w 2021 roku:  
a) ilostan oraz wiek, b) statystyki ogólne (25-ty i 75-ty percentyl, wykres pudełkowy; mediana, linia środkowa; średnia, krzyżyk; maksimum i minimum, wąsy) (na podstawie [55])

Pojazdy specjalne można również podzielić ze względu na obecność napędu lub jego brak. Na podstawie danych UTK [55] oraz rozporządzenia Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, w sprawie sposobu prowadzenia rejestru oraz sposobu oznakowania pojazdów kolejowych i ich klasyfikacji [56], opracowano zestawienie liczby pojazdów specjalnych ze względu na kryterium prędkości oraz posiadanego napędu (Rys. 2.24a). Dodatkowym kryterium była średnia wieku danych grup pojazdów (Rys. 2.24b). Najliczniejszą (1984 szt.) i jednocześnie najstarszą grupą pojazdów (43,85 lat) są te z możliwością włączenia do pociągu o prędkości mniejszej od 100 km/h lub z ograniczeniem, nieposiadające napędu. Oznacza to, że tylko ta grupa stanowi 53,1% wszystkich pojazdów specjalnych. Dodatkowo, do pojazdów bez napędu zaliczają się również inne podgrupy.

a)

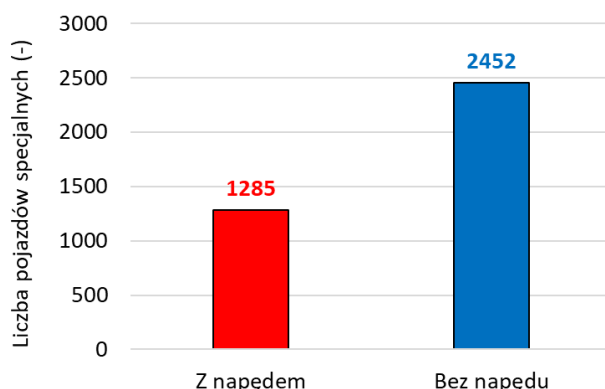
| Klasyfikacja                                                  |                                |            | Prędkość jazdy |            |        |
|---------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------|----------------|------------|--------|
|                                                               |                                |            | ≥ 100 km/h     | < 100 km/h | 0 km/h |
| Który może być włączony do pociągu o prędkości                | V ≥ 100 km/h                   | z napędem  | 67             | 161        |        |
|                                                               |                                | bez napędu |                |            | 58     |
|                                                               | V<100 km/h lub z ograniczeniem | z napędem  |                | 682        |        |
|                                                               |                                | bez napędu |                |            | 1984   |
| Który nie może być włączony do pociągu                        |                                | z napędem  |                | 342        |        |
|                                                               |                                | bez napędu |                |            | 410    |
| Pojazd szynowo-drogowy z napędem, który może być włączany     |                                |            |                |            |        |
| Pojazd szynowo-drogowy z napędem, który nie może być włączany |                                |            |                | 33         |        |
| Pojazd szynowo-drogowy bez napędu                             |                                |            |                |            |        |

b)

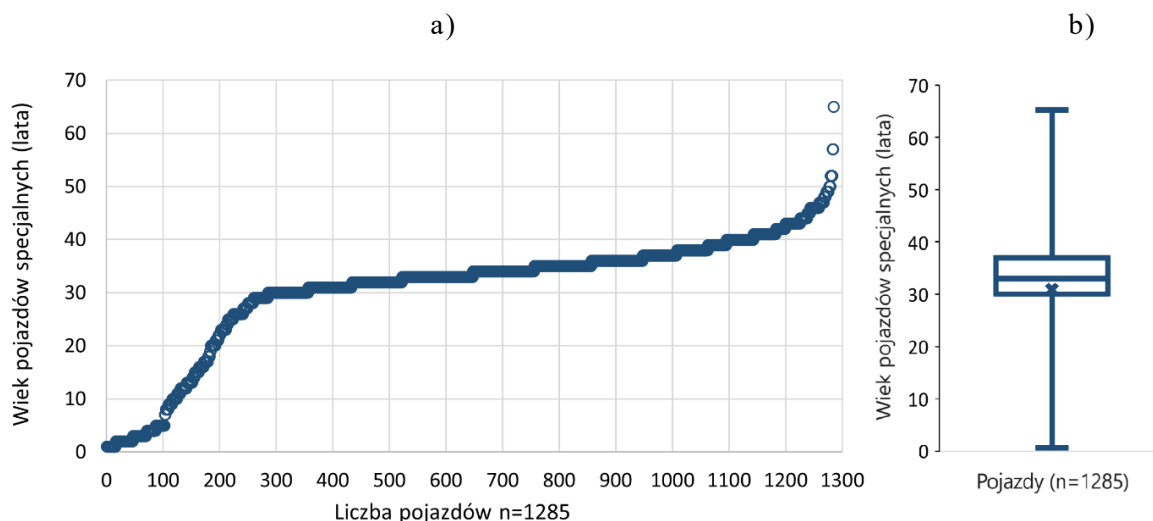
| Klasyfikacja                                                  |                                |            | Prędkość jazdy |            |        |
|---------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------|----------------|------------|--------|
|                                                               |                                |            | ≥ 100 km/h     | < 100 km/h | 0 km/h |
| Który może być włączony do pociągu o prędkości                | V ≥ 100 km/h                   | z napędem  | 13,30          | 30,27      |        |
|                                                               |                                | bez napędu |                |            | 17,66  |
|                                                               | V<100 km/h lub z ograniczeniem | z napędem  |                | 31,73      |        |
|                                                               |                                | bez napędu |                |            | 43,85  |
| Który nie może być włączony do pociągu                        |                                | z napędem  |                | 35,52      |        |
|                                                               |                                | bez napędu |                |            | 36,09  |
| Pojazd szynowo-drogowy z napędem, który może być włączany     |                                |            |                |            |        |
| Pojazd szynowo-drogowy z napędem, który nie może być włączany |                                |            |                | 4,33       |        |
| Pojazd szynowo-drogowy bez napędu                             |                                |            |                |            |        |

Rys. 2.24. Klasyfikacja pojazdów specjalnych ze względu na prędkość jazdy oraz napęd:  
a) Ilostan danej grupy pojazdów, b) Średni wiek danej grupy pojazdów (na podstawie [55,56])

Na bazie zestawienia dokonano ogólnego podziału pojazdów specjalnych ze względu na posiadany napęd. Z analiz wynika, że pojazdów specjalnych z napędem w 2021 roku w Polsce było 1285 sztuk (Rys. 2.25) i stanowiły 34,4% wszystkich pojazdów specjalnych. Pozostałe pojazdy (2452 szt.) nie były wyposażone w napęd, co oznacza, że w celu ich przemieszczenia wymagany jest inny pojazd trakcyjny. Na rysunku 2.26 przedstawiono zestawienie wieku wszystkich pojazdów specjalnych w Polsce, posiadających napęd. Widoczne jest, że w skład floty pojazdów wchodzi zarówno pojazdy nowo wyprodukowane oraz pojazdy odznaczające się znacznym wiekiem, gdzie najstarszy pojazd miał 65 lat (Rys. 2.26a). Z zestawienia wynika, że średnia wieku dla pojazdów trakcyjnych wynosiła w 2021 roku 30,9 lat, a mediana 33 lata (Rys. 2.26b). Istotnym jest, że znaczna część pojazdów odznacza się dość zbliżonym wiekiem. Potwierdza to wykres pudełkowy, gdzie dla 25-tego percentyla wiek wyniósł 30 lat, a dla 75-tego percentyla 37 lat. Pojazdy specjalne z napędem odznaczają się zatem stosunkowo wysokim wiekiem.



Rys. 2.25. Ilostan pojazdów specjalnych ze względu na zastosowanie napędu w Polsce w 2021 roku (na podstawie [55,56])



Rys. 2.26. Charakterystyka trakcyjnych pojazdów specjalnych w Polsce w 2021 roku: a) ilostan oraz wiek, b) statystyki ogólne (25-ty i 75-ty percentyl, wykres pudełkowy; mediana, linia środkowa; średnia, krzyżyk; maksimum i minimum, wąsy) (na podstawie [55])

W przypadku pojazdów specjalnych, dominującym rodzajem napędu są silniki spalinowe, głównie z ZS. Aktualnie trwają prace nad wprowadzeniem napędów alternatywnych do pojazdów szynowych [58], w tym pojazdów specjalnych [59], jednak jest to wymagający i długotrwały proces. Głównym powodem wykorzystania silników spalinowych jest przede wszystkim potrzeba uniwersalności i niezawodności takich pojazdów. Praca oraz przejazd pojazdów odbywa się bardzo często na liniach niezelektryfikowanych lub będących w naprawie, co wymaga zastosowania niezależnego źródła napędu.

Ważną podkreślenia jest informacja, że w zestawieniach znajdują się wyłącznie pojazdy z nadanym numerem NVR. Oznacza to, że analiza nie obejmuje pojazdów bez nadanego numeru, który upoważnia między innymi do poruszania się po linii kolejowej. Nieznana jest zatem dokładna liczba wszystkich pojazdów specjalnych w Polsce, a ich oszacowanie jest mocno utrudnione. Wiele z pojazdów może być eksploatowane bez posiadania numeru NVR, ponieważ przepisów Rozporządzenia [56] nie stosuje się do pojazdów:

1. poruszających się wyłącznie po bocznicach kolejowej;
2. szerokości toru mniejszej niż 1435 mm;
3. zabytkowych używanych jako nieruchomy eksponat;
4. pojazdów specjalnych poruszających się wyłącznie po torze zamkniętym lub transportowanych na innych pojazdach;
5. poruszających się wyłącznie po sieciach kolejowych, które są funkcjonalnie wyodrębnione z systemu kolei i przeznaczone tylko na potrzeby pasażerskich przewozów lokalnych oraz miejskich lub podmiejskich;
6. poruszających się wyłącznie po infrastrukturze kolejowej należącej do zarządców prywatnej infrastruktury kolejowej, na ich użytek w ramach własnej działalności w zakresie transportu towarów;
7. poruszających się wyłącznie po infrastrukturze kolejowej przewidzianej wyłącznie do użytku lokalnego, turystycznego lub historycznego;
8. historycznych nieporuszających się po sieci kolejowej.

W rzeczywistości ogólna liczba oraz wiek pojazdów specjalnych mogą być znacząco większe. Pojazdy, przykładowo należące do przedsiębiorstw, mogą być eksploatowane niezależnie na niepublicznych obszarach, a konieczność rejestracji i nadzoru takich pojazdów praktycznie nie dotyczy lub podlegają one pod mniej rygorystyczne wymagania. Zakłada się zatem, że stan techniczny pojazdów oraz układów i jednostek napędowych może być jeszcze niższej jakości niż pojazdów przedstawionych w zestawieniu.

### 3. Regulacje prawne

#### 3.1. ORE B13 Rp22 i karty UIC

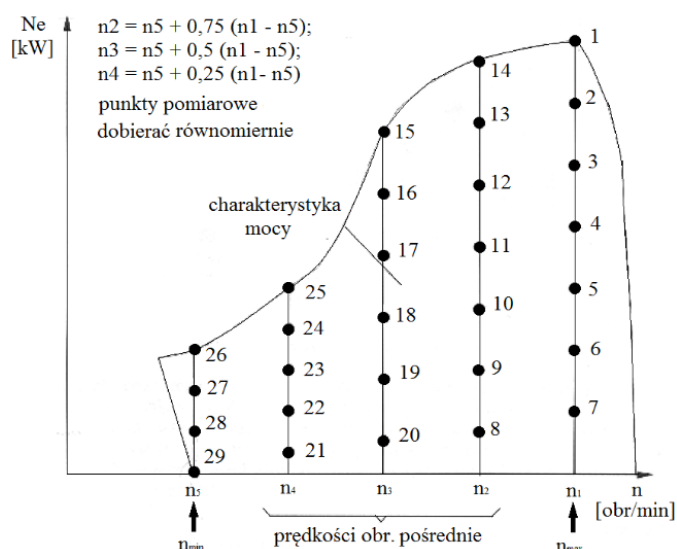
Jednymi z pierwszych wcielonych w życie przepisów, które regulują wymagania dla silników spalinowych pojazdów trakcyjnych w zakresie dopuszczalnych składników toksycznych emitowanych do atmosfery są:

- wymagania ujęte w raporcie ERRI (dawniej ORE - Office for Research and Experiment) [23],
- wymagania ujęte w kartach UIC [24,25].

Przepisy te nie mają umocowania prawnego w świetle prawa międzynarodowego. Są to jedynie zobowiązania kolei skupionych w UIC, czyli Międzynarodowym Związku Kolei. Ze względu na pojawienie się wielu prywatnych przewoźników, głównie towarowych, wprowadzone zostały Dyrektywy obowiązujące w Unii Europejskiej. Określono w nich szczegółowe wymagania dotyczące emisji składników toksycznych spalin, zarówno z pojazdów kołowych jak i szynowych. Treść Dyrektyw obowiązywała szerokim zakresem różne typy silników spalinowych. Było to potraktowane między innymi stosowaniem samochodowych silników spalinowych w pojazdach trakcyjnych takich jak np. pojazdy specjalne, pojazdy pomocnicze czy autobusy szynowe [60].

#### ORE B13 Rp22

Podstawą ORE B13 Rp22 jest 29-fazowy test badawczy przedstawiony na rysunku 3.1. Do potrzeb obliczeniowych z testu, który obowiązuje dla silników produkowanych w tamtym okresie, przyjmuje się jedynie cztery punkty pomiarowe. Wybór punktów zależy od prędkości obrotowych silnika (tj. minimalna, pośrednie, maksymalne), a także od mocy (tj. minimalnej oraz maksymalnej). Na tej podstawie punkty są dobierane równomiernie dla badanego silnika.



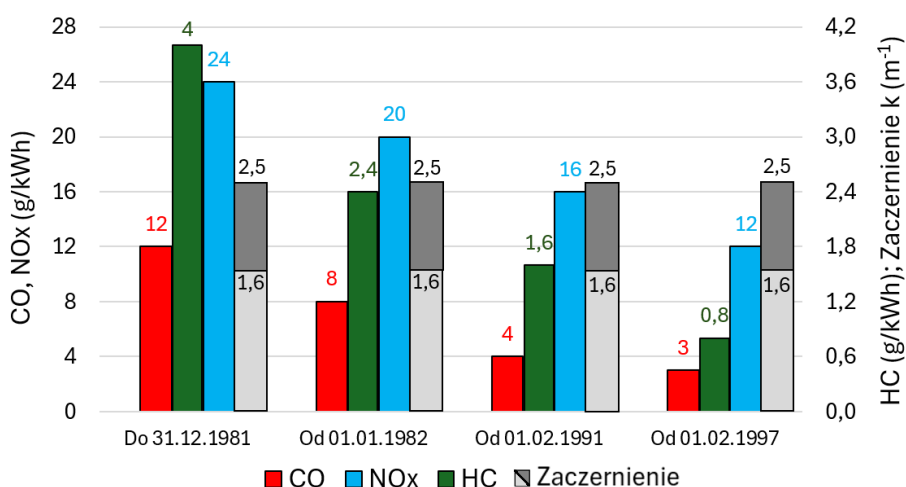
Rys. 3.1. Punkty pracy testu 29-fazowego według raportu ORE B13 na charakterystyce ogólnej silnika spalinowego [61]

W przypadku limitów emisji dotyczących 29-fazowego testu badawczego według ORE B13 na rysunku 3.2 oraz w tabeli 3.1 przedstawiono obowiązujące limity emisji spalin. W przypadku gazowych związków w spalinach takich jak tlenek węgla (CO), tlenek azotu ( $NO_x$ ) oraz węglowodory (HC) wartości są podane w emisji jednostkowej (g/kWh), czyli masie odniesionej do wykonanej pracy. Dodatkowo wymagane jest zmierzenie zaczernienia spalin wyrażone w skali logarytmicznej, która jest wycechowana w jednostkach współczynnika pochłaniania światła –  $k$  ( $m^{-1}$ ). Zmiany w przepisach wprowadzane na przestrzeni lat 1981-1997 dotyczyły wartości granicznych emisji wszystkich związków gazowych. Odnosząc wartości obowiązujące od 1997 roku do wartości obowiązujących do końca 1981 roku w przypadku CO doszło do czterokrotnej redukcji wartości dopuszczalnych (z 12 g/kWh do 3 g/kWh), dla  $NO_x$  zmniejszono limity dwukrotnie

(z 24 g/kWh do 12 g/kWh), a dla HC pięciokrotnie (z 4 g/kWh do 0,8 g/kWh). W przypadku zaczernienia wartości dopuszczalne w kolejnych zmianach przepisów na przestrzeni lat nie uległy zmianom i zawierały się od 1,6 do 2,5 m<sup>-1</sup> w zależności od konkretnych wymagań.

Tab. 3.1. Wartości graniczne emisji dla ORE B13 Rp22 [60,62]

| Data wprowadzenia / obowiązowania                            | CO [g/kWh] | NO <sub>x</sub> [g/kWh] | HC [g/kWh] | Zaczernienie k [m <sup>-1</sup> ] |
|--------------------------------------------------------------|------------|-------------------------|------------|-----------------------------------|
| Do 31.12.1981                                                | 12         | 24                      | 4          | 1,6 ÷ 2,5                         |
| Od 01.01.1982                                                | 8          | 20                      | 2,4        | 1,6 ÷ 2,5                         |
| Od 01.02.1991                                                | 4          | 16                      | 1,6        | 1,6 ÷ 2,5                         |
| Od 01.02.1997                                                | 3          | 12                      | 0,8        | 1,6 ÷ 2,5                         |
| Różnica pomiędzy najstarszą, a najnowszą wersją ORE B13 Rp22 | - 75%      | -50%                    | -80%       | brak                              |



Rys. 3.2. Wartości graniczne związków szkodliwych według ORE B13 Rp22 (na podstawie [60,62])

### Karty UIC

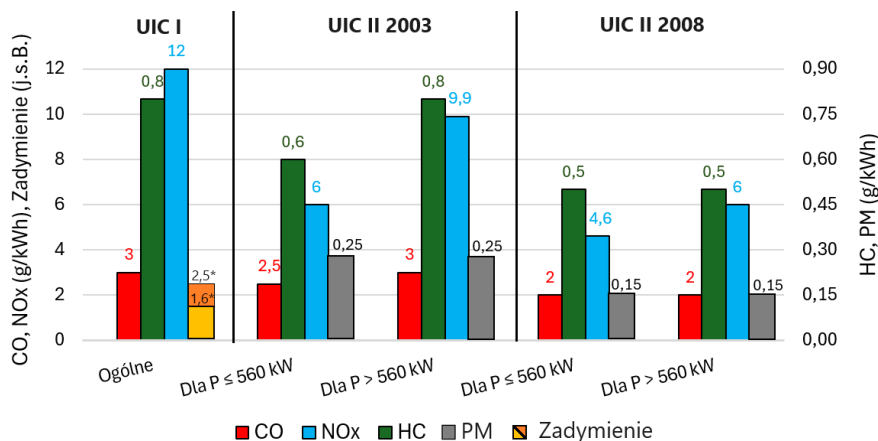
Przepisy dotyczące emisji spalin z silników trakcyjnych pojazdów szynowych w Europie zostały zawarte w kartach UIC 623-2 [63] oraz UIC 624 (Union Internationale des Chemins de fer) [64]. Wartości dopuszczalne emisji spalin dotyczą nowo produkowanych silników o ZS przeznaczonych do lokomotyw oraz autobusów szynowych. Wyjątkami, do których nie stosuje się wymienionych przepisów, są lokomotywy o przeznaczeniu specjalnym, które pracują np. w kopalniach, a także silniki trakcyjne o mocy mniejszej niż 100 kW (Rys. 3.3, Tab. 3.2). W celu weryfikacji emisji spalin z silników trakcyjnych dla przepisów UIC wykorzystywany jest test ISO 8178-4 cykl F (Rys. 3.4), który jest częścią wielopunktowego standardu do testowania silników do zastosowania w pojazdach pozadrogowych. Cykl F uwzględnia trzy punkty pomiarowe obciążenia silnika spalinowego, gdzie istotnym czynnikiem różniącym się w zależności od punktu pracy jest tzw. „weighting factor” czyli czynnik wagowy. Oznacza to, że wyemitowane w danym punkcie pracy związki szkodliwe spalin, podczas obliczeń będą miały indywidualną wagę, która ma wpływ na końcowe wartości emisji. Dla tego testu punkty pomiarowe oraz ich „współczynniki wagowe” są następujące (Tab. 3.3):

1. Bieg jałowy (60%),
2. Bieg pośredni (15%): prędkość obrotowa pośrednia oraz około 50% obciążenia,
3. Bieg maksymalny (25%): prędkość obrotowa maksymalna oraz 100% obciążenia.

W teście obciążenie silnika wyraża się w procentach maksymalnego dostępnego momentu obrotowego przy danej prędkości obrotowej silnika. Prędkość nominalna/znamięnowa to prędkość, przy której producent określa moc znamionową silnika, a prędkość pośrednia to prędkość odpowiadająca szczytowemu momentowi obrotowemu silnika.

Tab. 3.2. Wartości graniczne emisji dla kart UIC 623-2 i UIC 624, gdzie \* obowiązywanie pomiaru zadymienia spalin do 31.12.2002 r. (na podstawie [60,62])

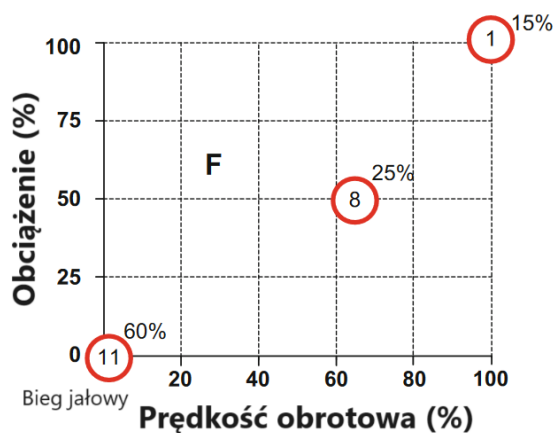
| Data wprowadzenia / obowiązywania |                | CO<br>[g/kWh] | NOx<br>[g/kWh]                                       | HC<br>[g/kWh] | PM<br>[g/kWh] |
|-----------------------------------|----------------|---------------|------------------------------------------------------|---------------|---------------|
| UIC I do 31.12.2002               |                | 3             | 12                                                   | 0,8           | 1,6 (2,5)*    |
| UIC II od 01.01.2003              | Dla P ≤ 560 kW | 2,5           | 6                                                    | 0,6           | 0,25          |
|                                   | Dla P > 560 kW | 3             | 9,5 dla n > 1000 obr/min<br>9,9 dla n < 1000 obr/min | 0,8           | 0,25          |
| UIC II od 01.01.2008              | Dla P ≤ 560 kW | 2             | 4,6                                                  | 0,5           | 0,15          |
|                                   | Dla P > 560 kW | 2             | 6                                                    | 0,5           | 0,2           |



Rys. 3.3. Wartości graniczne emisji spalin związków toksycznych dla pojazdów szynowych według karty UIC 624, gdzie: \* przy wydatku powietrza powyżej 1 kg/s wartość zadymienia wynosi 2,5 j.s.B. (na podstawie [60,62])

Tab. 3.3. Punkty prędkości/obciążenia i współczynniki wagowe (%) cyklu ISO 8178 F dla silników kolejowych [60,62]

| Punkt pracy       | 1         | 2 | 3 | 4 | 5 | 6         | 7 | 8  | 9 | 10 | 11          |
|-------------------|-----------|---|---|---|---|-----------|---|----|---|----|-------------|
| Obciążenie (%)    | 100       | - | - | - | - | -         | - | 50 | - | -  | 0           |
| Prędkość obrotowa | Nominalna |   |   |   |   | Pośrednia |   |    |   |    | Bieg jałowy |
| Lokomotywy        |           |   |   |   |   |           |   |    |   |    |             |
| Cykl F            | 15        | - | - | - | - | -         | - | 25 | - | -  | 60          |



Rys. 3.4. Punkty pracy (1, 8, 11), udziały (%) 3-fazowego testu ISO 8178-4 cyklu F (na podstawie [65])

## 3.2. Normy Stage

### 3.2.1. Wprowadzenie

Pojazdy szynowe są skategoryzowane w grupie pojazdów NRMM (Non-Road Mobile Machinery), czyli przeznaczenia pozadrogowego. Dla tego typu pojazdów w Europie obowiązującymi przepisami dotyczącymi dopuszczalnych wartości emisji spalin są wymagania ujęte w normach Stage I-V. Podstawą ustalenia wymagań i wprowadzenia kolejnych obowiązujących etapów (Stage) była „Dyrektywa 97/68/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 grudnia 1997 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do środków dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojezdnych nieporuszających się po drogach” [66] wraz z jej późniejszymi zmianami. Najważniejsze dyrektywy, które zostały wprowadzone w celu regulacji wymagań i dopuszczalnych poziomów emisji spalin dla odpowiedniej normy dla pojazdów typu NRMM zostały przedstawione w tabeli 4.4.

Tab. 3.4. Najważniejsze dyrektywy i rozporządzenia dla maszyn typu NRMM dla norm Stage

| Numer Dyrektywy / Rozporządzenia | Data wprowadzenia | Opis                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 97/68/WE [66]                    | 16.12.1997        | Wprowadzenie norm Stage I oraz Stage II dla silników ZS o mocy 37 – 560 kW                                                                                                                                                            |
| 2002/88/WE [67]                  | 09.12.2002        | Rozszerzenie norm emisji spalin dla silników o Zapłonie Iskrowym (ZI) o mocy poniżej 19 kW oraz rozszerzenie zastosowania norm Stage II dla silników o stałej prędkości obrotowej                                                     |
| 2004/26/WE [68]                  | 21.04.2004        | Wprowadzenie wytycznych dla norm Stage IIIA, Stage IIIB oraz Stage IV, wprowadzenie norm dla silników ZS poniżej 19 kW oraz pojazdów szynowych i statków żeglugi śródlądowej                                                          |
| 2006/105/WE [69]                 | 20.11.2006        | Wprowadzenie zmian do Dyrektywy 97/68/WE w zakresie homologacji silników                                                                                                                                                              |
| 2010/26/UE [70]                  | 31.03.2010        | Wprowadzenie zmian technicznych w zakresie testów oraz homologacji silników dla norm Stage IIIB oraz Stage IV                                                                                                                         |
| 2011/88/UE [71]                  | 16.11.2011        | Wprowadzenie „formuły elastycznej”, która umożliwiała wytwórcom urządzeń zakup – w okresie pomiędzy dwoma etapami emisji – ograniczonej liczby silników, które nie spełniają wartości granicznych emisji obowiązujących w tym okresie |
| 2012/46/EU [72]                  | 06.12.2012        | Wprowadzenie zmian w Dyrektywie 97/68/WE spowodowane rozwojem technologii pomiarowych                                                                                                                                                 |
| 2016/1628 [73]                   | 14.09.2016        | Wprowadzenie wytycznych dla norm Stage V m.in. podział silników ze względu na kategorie, wprowadzenie limitów liczby cząstek stałych dla wybranych kategorii                                                                          |
| 2017/654 [74]                    | 19.12.2016        | Wprowadzenie uzupełnień do Dyrektywy 2017/654 na temat wymogów technicznych i ogólnych oraz metody badań dotyczących wartości granicznych emisji                                                                                      |
| 2017/655 [75]                    | 19.12.2016        | Wprowadzenie monitorowania emisji zanieczyszczeń gazowych podczas eksploatacji dla silników kategorii NRE-v-5 oraz NRE-v-6                                                                                                            |
| 2018/987 [76]                    | 27.04.2018        | Zmiany do Rozporządzenia (UE) 2017/655 i (UE) 2016/1628 odnośnie do monitorowania emisji zanieczyszczeń gazowych w trakcie eksploatacji                                                                                               |
| 2018/989 [77]                    | 18.05.2018        | Zmiany dotyczące wymogów technicznych i ogólnych dotyczących wartości granicznych emisji i homologacji typu                                                                                                                           |

### 3.2.2. Stage I i Stage II

Norma emisji spalin Stage I została wprowadzona w 1999 roku i obejmowała silniki, które miały być zainstalowane w maszynach samojezdnych nieporuszających się po drogach. W celu objęcia wprowadzoną Dyrektywą 97/68/WE z dnia 16 grudnia 1997 r. [66], silniki musiały być zainstalowane w maszynach, które odpowiadają między innymi takim wymaganiom jak:

- są przeznaczone i przystosowane do poruszania się lub do przemieszczania ich w terenie po drogach lub bezdrożach,
- są wyposażone w silniki o ZS od 37 kW do 560 kW,
- silniki spalinowe pracują raczej przy zmiennej prędkości obrotowej, niż przy jednej ustalonej prędkości.

Maszynami, których silniki objęte były definicją podaną w Dyrektywie, były (ale nie były tylko do nich ograniczone):

- przemysłowe urządzenia wiertnicze, sprężarki itd.,
- urządzenia budowlane, w tym ładowarki kołowe, spycharki, ciągniki gąsienicowe, ładowarki gąsienicowe, ładowarki typu samochodowego, terenowe samochody ciężarowe, koparki hydrauliczne itd.,
- urządzenia rolnicze, wirujące maszyny do uprawy roli,
- urządzenia leśne,
- samojezdne pojazdy rolnicze (z wyjątkiem ciągników rolniczych, określonych w wymaganych Dyrektywach),
- urządzenia do podawania materiału,
- wózki widłowe,
- urządzenia do naprawy dróg (równiarki silnikowe, walce drogowe, równiarki do asfaltu),
- urządzenia do odśnieżania,
- urządzenia do umacniania gruntu na lotniskach,
- podnośniki bramowe, dźwigi samojezdne.

Wprowadzona Dyrektywa 97/68/WE [66] nie obejmowała silników spalinowych do między innymi takich zastosowań jak:

- statki,
- lokomotywy kolejowe,
- samoloty,
- zespoły prądotwórcze.

Dodatkowo, wspomniana Dyrektywa nie miała zastosowania do silników napędzających:

- pojazdy określone w dyrektywie 70/156/EWG [78] i w dyrektywie 92/61/EWG,
- ciągniki rolnicze określone w Dyrektywie 74/150/EWG.

Tab. 3.5. Wartości graniczne emisji Stage I oraz Stage II

| Kategoria | Moc netto (P) | Data wejścia | CO    | HC  | NO <sub>x</sub> | PM   |
|-----------|---------------|--------------|-------|-----|-----------------|------|
|           | kW            |              | g/kWh |     |                 |      |
| Stage I   |               |              |       |     |                 |      |
| A         | 130 ≤ P ≤ 560 | 1999.01      | 5,0   | 1,3 | 9,2             | 0,54 |
| B         | 75 ≤ P ≤ 130  | 1999.01      | 5,0   | 1,3 | 9,2             | 0,70 |
| C         | 37 ≤ P ≤ 75   | 1999.04      | 6,5   | 1,3 | 9,2             | 0,85 |
| Stage II  |               |              |       |     |                 |      |
| E         | 130 ≤ P ≤ 560 | 2002.01      | 3,5   | 1,0 | 6,0             | 0,2  |
| F         | 75 ≤ P ≤ 130  | 2003.01      | 5,0   | 1,0 | 6,0             | 0,3  |
| G         | 37 ≤ P ≤ 75   | 2004.01      | 5,0   | 1,3 | 7,0             | 0,4  |
| D         | 18 ≤ P ≤ 37   | 2001.01      | 5,5   | 1,5 | 8,0             | 0,8  |

Silniki, które były objęte przepisami normy Stage I zostały podzielone ze względu na moc na trzy kategorie: Kategoria A ( $130 \leq P \leq 560$  kW), Kategoria B ( $75 \leq P \leq 130$  kW), Kategoria C ( $37 \leq P \leq 75$  kW). Obowiązujące limity emisji spalin dotyczyły takich związków toksycznych jak CO, HC, NO<sub>x</sub>, oraz cząstki stałe (PM) wyrażone w g/kWh.

Kolejnym etapem było wprowadzenie normy Stage II, w której dodany został dodatkowy zakres mocy silników dla  $18 \leq P \leq 37$  kW (Kategoria D). Obowiązujące wcześniej zakresy mocy pozostały takie same. Zmianom uległy nazwy kategorii z obowiązującymi wcześniej zakresami mocy silników na: E, F, G, kolejno od największych wartości. W przypadku Stage II w większości kategorii zmianom uległy wartości dopuszczalne emisji każdego związku toksycznego względem Stage I. Największa redukcja wartości dopuszczalnych emisji dotyczyła cząstek stałych, gdzie dla Kategorii E redukcja wyniosła 63%, Kategorii F 57%, a Kategorii G 53% (Tab. 3.5).

### 3.2.3. Stage III i Stage IV

Normy emisji spalin Stage III i Stage IV zostały przyjęte 21 kwietnia 2004 roku Dyrektywą 2004/26/WE [68], a dla pojazdów rolniczych oraz ciągników 21 lutego 2005 roku. Normy Stage III, których pierwsze wymagania prawne zaczęły obowiązywać od 2006 roku, zostały w późniejszym czasie podzielone na Stage III A oraz Stage III B (Tab. 3.6.). Wprowadzone normy, oprócz obowiązujących we wcześniejszych Stage I i Stage II maszyn, rozszerzyły zakres obowiązywania przepisów na silniki przeznaczone do lokomotyw i silniki okrętowe stosowane w statkach żeglugi śródlądowej. Przepisy etapu III/IV mają zastosowanie wyłącznie do nowych pojazdów i maszyn. Silniki zamienne, które mają być stosowane w maszynach już eksploatowanych (z wyłączeniem silników napędowych wagonów, lokomotyw i statków żeglugi śródlądowej) powinny odpowiadać wartościom granicznym, jakie musiał spełniać silnik przeznaczony do wymiany w momencie pierwotnego wprowadzenia do obrotu. W przypadku normy Stage IV nie przewidziano unormowań dla silników trakcyjnych

Silniki służące do napędu pojazdów kolejowych o mocy powyżej 130 kW podlegają normie emisji spalin Stage III i dotyczą silników do lokomotyw oraz tak zwanych wagonów silnikowych (railcar). W przypadku Stage III A silniki przeznaczone do trakcyjnych pojazdów kolejowych zostały podzielone na trzy kategorie: RC A dla wagonów silnikowych o mocy  $P > 130$  kW (od 2006 r.), RL A dla lokomotyw o mocy  $130 \leq P \leq 560$  kW (od 2007 r.) oraz RH A dla lokomotyw o mocy  $P > 560$  kW (od 2009 r.). Dla wszystkich kategorii wartości dopuszczalne CO (3,5 g/kWh) oraz PM (0,2 g/kWh) były takie same. W przypadku HC oraz NO<sub>x</sub> wartości nieco się różnią. W przypadku kategorii RH A dopuszczalna wartość HC wynosi 0,5 g/kWh, a NO<sub>x</sub> 6 g/kWh, z wyjątkami silników o mocy większej niż 2000 kW lub objętości skokowej cylindra większej niż 5 litrów. W przypadku kategorii RC A oraz RL A wartości dla HC i NO<sub>x</sub> są ze sobą sumowane, a ich limit wynosi 4 g/kWh.

Tab. 3.6. Wartości graniczne emisji Stage III A oraz Stage III B

| Kategoria                                                                                       | Moc netto (P) | Data wejścia | CO    | HC               | NO <sub>x</sub> | PM    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------|-------|------------------|-----------------|-------|
|                                                                                                 | kW            |              | g/kWh |                  |                 |       |
| Stage III A                                                                                     |               |              |       |                  |                 |       |
| RC A                                                                                            | P > 130       | 2006         | 3,5   | 4,0 <sup>a</sup> |                 | 0,2   |
| RL A                                                                                            | 130 ≤ P ≤ 560 | 2007         | 3,5   | 4,0 <sup>a</sup> |                 | 0,2   |
| RH A                                                                                            | P > 560       | 2009         | 3,5   | 0,5*             | 6,0*            | 0,2   |
| Stage III B                                                                                     |               |              |       |                  |                 |       |
| RC B                                                                                            | P > 130       | 2012         | 3,5   | 0,19             | 2,0             | 0,025 |
| R B                                                                                             | P > 130       | 2012         | 3,5   | 4,0 <sup>a</sup> |                 | 0,025 |
| a = HC + NO <sub>x</sub>                                                                        |               |              |       |                  |                 |       |
| * HC = 0,4 g/kWh i NO <sub>x</sub> = 7,4 g/kWh dla silników P > 2000 kW i D > 5 litrów/cylinder |               |              |       |                  |                 |       |

Od 2012 roku obowiązującą normą dla silników powyżej 130 kW wykorzystywanych do napędu lokomotyw oraz wagonów silnikowych jest norma Stage III B. Została ona podzielona na dwie kategorie ze względu na przeznaczenie: RC B dla wagonów silnikowych oraz R B dla lokomotyw. Dopuszczalne wartości w przypadku CO dla obu kategorii pozostały takie same jak w przypadku Stage III A (3,5 g/kWh). W przypadku wagonów silnikowych dopuszczalne wartości HC zostały ustalone na poziomie 0,19 g/kWh, a dla NO<sub>x</sub> 2 g/kWh. Dla silników lokomotyw normy Stage III B wymagają sumowania emisji HC oraz NO<sub>x</sub>, a dopuszczalna wartość wynosi 4 g/kWh. Największe zmiany pomiędzy Stage III B, a Stage III A objęły dopuszczalne wartości PM. Zmniejszenie emisji jednostkowej PM z 0,2 g/kWh do 0,025 g/kWh oznacza redukcję o 87,5%.

### 3.2.4. Stage V

Kolejnym, aktualnie obowiązującym etapem, było wprowadzenie norm emisji spalin Stage V. Zgodnie z przepisami normy Stage V dla pojazdów typu NRMM zostały podzielone na dziesięć kategorii silnikowych, które zostały przedstawione w tabeli 3.7. W przypadku pojazdów kolejowych dwoma głównymi kategoriami, które dotyczą silników każdej mocy, są:

- RLL – Silniki do napędu lokomotyw kolejowych (Locomotives),
- RLR – Silniki do napędu wagonów silnikowych i zespołów trakcyjnych (Railcars).

Należy jednak mieć na uwadze, że obowiązujące normy Stage V dotyczą również spalinowych silników trakcyjnych wykorzystywanych w pozostałych pojazdach szynowych, a także silników pomocniczych. Znaczną część taboru kolejowego stanowią pojazdy specjalne lub pomocnicze, gdzie silniki spalinowe dla maszyn tego typu sklasyfikowane są w kategorii NRE. W tym wypadku kategoria NRE jest podzielona na siedem grup ze względu na zakres mocy silników i zawiera się od najmniejszych mocy silników ( $P < 8$  kW) w NRE 1, aż do silników o mocy większej niż 560 kW w NRE 7. Silniki pomocnicze wykorzystywane w pojazdach kolejowych, w tym między innymi w lokomotywach i wagonach silnikowych, sklasyfikowane są w kategoriach NRE lub NRS. Wprowadzone zostały również rozróżnienia przy kategoriach silnika ze względu na charakter pracy poprzez dodanie oznaczeń „c” lub „v”. Silniki pracujące ze stałą prędkością obrotową zostały oznaczone jako „c” (z ang. constant speed), a silniki pracujące ze zmienną prędkością obrotową oznaczono literą „v” (z ang. variable speed).

Tab. 3.7. Kategorie silników spalinowych do maszyn typu NRMM dla normy emisji spalin Stage V

| Lp.  | Kategoria | Przeznaczenie                                                                                                                                                       |
|------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I    | NRE       | Silniki do maszyn mobilnych nieporuszających się po drogach, przystosowane do przemieszczania lub mające być przemieszczane, nieujęte w żadnym z poniższych punktów |
| II   | NRG       | Silniki o mocy powyżej 560 kW stosowane w zespołach prądotwórczych                                                                                                  |
| III  | NRSh      | Silniki o ZI o mocy poniżej 19 kW wyłącznie do użytku w maszynach ręcznych                                                                                          |
| IV   | NRS       | Silniki o ZI o mocy poniżej 56 kW, które nie są ujęte w kategorii NRSh                                                                                              |
| V    | IWP       | Silniki o mocy powyżej 19 kW stosowane do bezpośredniego lub pośredniego napędu statków żeglugi śródlądowej                                                         |
| VI   | IWA       | Silniki pomocnicze o mocy powyżej 19 kW do stosowania na statkach żeglugi śródlądowej                                                                               |
| VII  | RLL       | Silniki do napędu lokomotyw kolejowych                                                                                                                              |
| VIII | RLR       | Silniki do napędu wagonów silnikowych / zespołów trakcyjnych                                                                                                        |
| IX   | SMB       | Silniki o ZI stosowane w skuterach śnieżnych                                                                                                                        |
| X    | ATS       | Silniki o ZI stosowane we wszystkich pojazdach terenowych i pojazdach typu „side-by-side”                                                                           |

Wartości graniczne emisji spalin dla normy Stage V dla silników lokomotyw (RLL) oraz wagonów silnikowych i zespołów trakcyjnych (RLR) zostały przedstawione w tabeli 3.8, a dla kategorii silników NRE w tabeli 3.9. Norma emisji spalin Stage V dotyczy emisji tych samych związków toksycznych spalin co w poprzednio obowiązujących normach Stage, tj. CO, HC, NO<sub>x</sub>, PM. W przypadku lokomotyw (RLL) i wagonów silnikowych (RLR) wartość graniczna CO nie uległa zmianie, względem poprzedniej normy Stage III B i wynosi 3,5 g/kWh. Zmianie nie uległy również limity i sposób weryfikowania dla HC oraz NO<sub>x</sub>. Dla silników lokomotyw wartość emisji PM nie uległa zmianie i pozostała na poziomie 0,025 g/kWh. Ograniczeniu o 40%, względem Stage III B, uległa wartość dopuszczalnej emisji PM dla wagonów silnikowych. Obowiązująca dopuszczalna wartość wynosi 0,015 g/kWh.

Największą różnicą, w porównaniu z poprzednio obowiązującymi normami, jest wprowadzenie limitu emisji jednostkowej liczby cząstek stałych (PN), wyrażonej w 1/kWh. Ograniczenie emisji dopuszczalnej liczby cząstek stałych dotyczy kategorii silnikowej RLR (wagony silnikowe) oraz kategorii silnikowej NRE w przedziale mocy od 19 do 560 kW (od NRE 3 do NRE 6). Wartość dopuszczalna liczby cząstek stałych została ustalona na  $1 \times 10^{12}$ /kWh.

Tab. 3.8. Wartości graniczne normy emisji spalin Stage V dla lokomotyw oraz wagonów silnikowych

| Kategoria                                                      | Moc netto (P) | Data wejścia | CO  | HC <sup>a</sup>  | NO <sub>x</sub> | PM    | PN                 |
|----------------------------------------------------------------|---------------|--------------|-----|------------------|-----------------|-------|--------------------|
|                                                                | kW            |              |     | g/kWh            |                 |       |                    |
| RLL-v/c-1<br>(Lokomotywy)                                      | P > 0         | 2021         | 3,5 | 4,0 <sup>b</sup> |                 | 0,025 | -                  |
| RLR-v/c-1<br>(Wagony silnikowe)                                | P > 0         | 2021         | 3,5 | 0,19             | 2,0             | 0,015 | 1x10 <sup>12</sup> |
| a – A = 6,00 dla silników gazowych<br>b = HC + NO <sub>x</sub> |               |              |     |                  |                 |       |                    |

Tab. 3.9. Wartości graniczne normy emisji spalin Stage V dla silników spalinowych szynowych pojazdów specjalnych oraz silników pomocniczych

| Kategoria                                                                                                                                                                                           | Rodzaj zapłonu | Moc netto (P) | Data    | CO    | HC <sup>a</sup>     | NO <sub>x</sub> | PM                | PN                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------|---------|-------|---------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
|                                                                                                                                                                                                     |                | kW            | wejścia | g/kWh |                     |                 |                   | 1/kWh              |
| NRE-v/c-1                                                                                                                                                                                           | ZS             | P < 8         | 2019    | 8,00  | 7,50 <sup>a,c</sup> |                 | 0,40 <sup>b</sup> | -                  |
| NRE-v/c-2                                                                                                                                                                                           | ZS             | 8 ≤ P < 19    | 2019    | 6,60  | 7,50 <sup>a,c</sup> |                 | 0,40              | -                  |
| NRE-v/c-3                                                                                                                                                                                           | ZS             | 19 ≤ P < 37   | 2019    | 5,00  | 4,70 <sup>a,c</sup> |                 | 0,015             | 1x10 <sup>12</sup> |
| NRE-v/c-4                                                                                                                                                                                           | ZS             | 37 ≤ P < 56   | 2019    | 5,00  | 4,70 <sup>a,c</sup> |                 | 0,015             | 1x10 <sup>12</sup> |
| NRE-v/c-5                                                                                                                                                                                           | Wszystkie      | 56 ≤ P < 130  | 2020    | 5,00  | 0,19 <sup>c</sup>   | 0,40            | 0,015             | 1x10 <sup>12</sup> |
| NRE-v/c-6                                                                                                                                                                                           | Wszystkie      | 130 ≤ P ≤ 560 | 2019    | 3,50  | 0,19 <sup>c</sup>   | 0,40            | 0,015             | 1x10 <sup>12</sup> |
| NRE-v/c-7                                                                                                                                                                                           | Wszystkie      | P > 560       | 2019    | 3,50  | 0,19 <sup>d</sup>   | 3,50            | 0,045             | -                  |
| a – HC + NO <sub>x</sub><br>b – 0,60 do uruchamianych ręcznie, chłodzonych powietrzem silników z bezpośrednim wtryskiem<br>c – a = 1,10 dla silników gazowych<br>d – a = 6,00 dla silników gazowych |                |               |         |       |                     |                 |                   |                    |

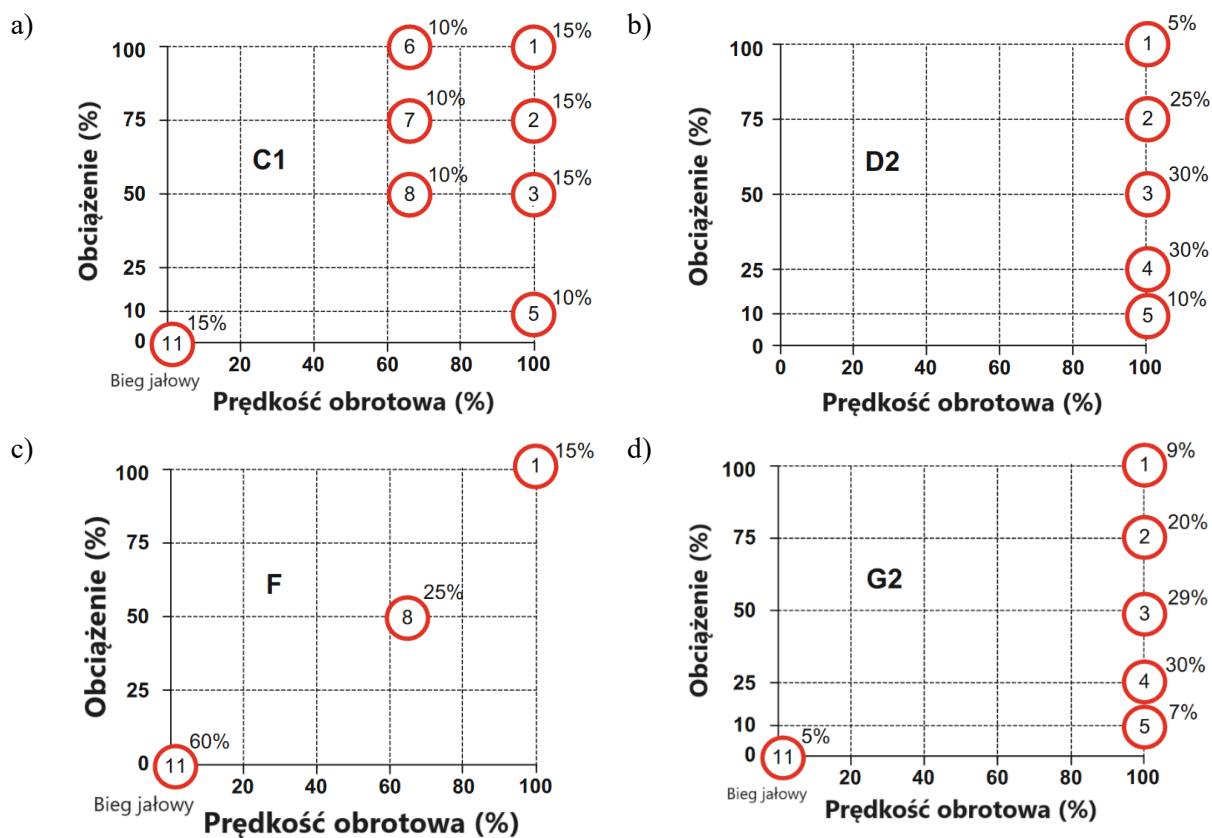
### 3.2.5. Testy badawcze norm Stage

Weryfikacja i homologacja emisji spalin z silników spalinowych do maszyn typu NRMM odbywa się poprzez realizację pomiarów emisji spalin na hamowni silnikowej. Testy można podzielić ze względu na charakter pracy silnika podczas badań tj. test statyczny i test dynamiczny. Badania statyczne przeprowadzane są według standardu ISO 8178, zwanego również NRSC (Non-Road Steady Cycle), dla wszystkich silników do NRMM od wprowadzenia normy Stage I. Jest to zbiór jedenastu zdefiniowanych statycznych punktów pracy silnika spalinowego tj. obciążenie/prędkość obrotowa, wraz z udziałami tzw. „weighting factors”. Test NRSC jest podzielony ze względu na przeznaczenie oraz charakter pracy silników na dedykowane dla poszczególnych grup cykle. Wszystkie cykle testowe są wykonywane w kolejności rosnącej według numeru trybu danego cyklu. W tabeli 3.10 przedstawiono podział cyklów NRSC dla wybranych grup silników spalinowych.

Podstawowymi cyklami badawczymi NRSC silników spalinowych do wykorzystania w pojazdach kolejowych są cykle: F, C1 oraz D2. W nielicznych przypadkach, gdy wykorzystane są silniki NRE-v1 lub NRE-v-2, jest to cykl G2. Każdy z cykli posiada swój indywidualny charakter i liczbę punktów pracy. Najmniejszą liczbę punktów pracy posiada cykl F (3 punkty). Cykl badawczy F zaczyna się od punktu 1, gdzie silnik pracuje z prędkością nominalną i pełnym obciążeniem, a udział wyników z tego punktu pracy stanowi 15%. Drugim punktem pracy jest punkt numer 8, gdzie silnik pracuje z prędkością pośrednią i obciążeniem 50%, a „weighting factor” stanowi 25%. Największy udział (60%) stanowi praca na biegu jałowym w punkcie 11. Pozostałe cykle pomiarowe wykonywane są z uwzględnieniem indywidualnych punktów pracy, przedstawionych na rysunku 3.5 oraz w tabeli 3.11.

Tab. 3.10. Cykle badania NRSC w odniesieniu do silników kategorii RLL, RLR oraz NRE  
(na podstawie [73])

| Kategoria | Charakter prędkości | Cel                                                                                                            | Podkategoria                                                              | NRSC         |
|-----------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------|
| RLL       | Zmienna             | Silnik o zmiennej prędkości obrotowej do napędu lokomotyw                                                      | RLL-v-1                                                                   | F            |
|           | Stała               | Silnik o stałej prędkości obrotowej do napędu lokomotyw                                                        | RLL-c-1                                                                   | D2           |
| RLR       | Zmienna             | Silnik o zmiennej prędkości obrotowej do napędu wagonów silnikowych                                            | RLR-v-1                                                                   | C1           |
|           | Stała               | Silnik o stałej prędkości obrotowej do napędu wagonów silnikowych                                              | RLR-c-1                                                                   | D2           |
| NRE       | Zmienna             | Silnik o zmiennej prędkości obrotowej o mocy odniesienia poniżej 19 kW                                         | NRE-v-1<br>NRE-v-2                                                        | G2<br>lub C1 |
|           |                     | Silnik o zmiennej prędkości obrotowej o mocy odniesienia powyżej lub równej 19 kW, ale nie większej niż 560 kW | NRE-v-3<br>NRE-v-4<br>NRE-v-5<br>NRE-v-6                                  | C1           |
|           |                     | Silnik o zmiennej prędkości obrotowej o mocy odniesienia powyżej 560 kW                                        | NRE-v-7                                                                   | C1           |
|           | Stała               | Silnik o stałej prędkości obrotowej                                                                            | NRE-c-1<br>NRE-c-2<br>NRE-c-3<br>NRE-c-4<br>NRE-c-5<br>NRE-c-6<br>NRE-c-7 | D2           |
|           |                     |                                                                                                                |                                                                           |              |

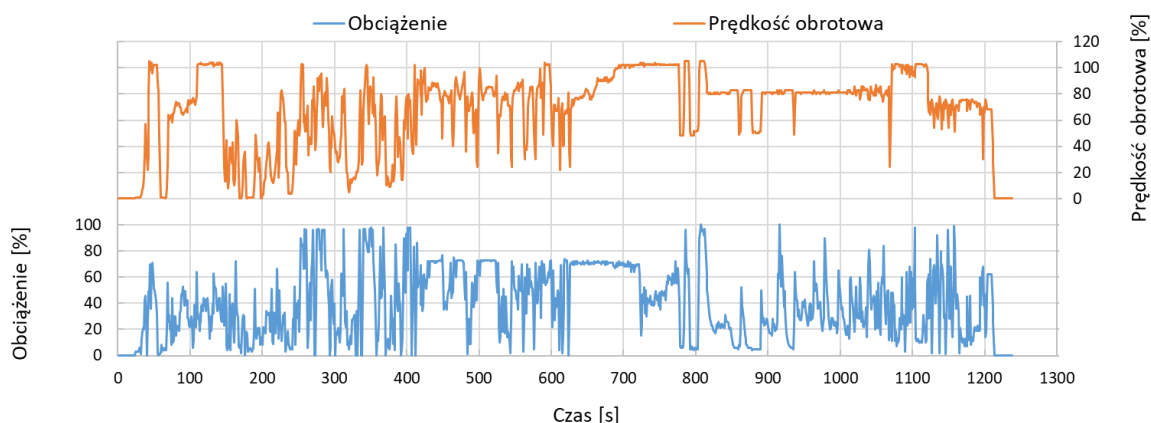


Rys. 3.5. Punkty pomiarowe prędkość obrotowa/obciążenie wraz z udziałami (%) testu NRSC dla cykli: a) C1, b) D2, c) F, d) G2 (na podstawie [65])

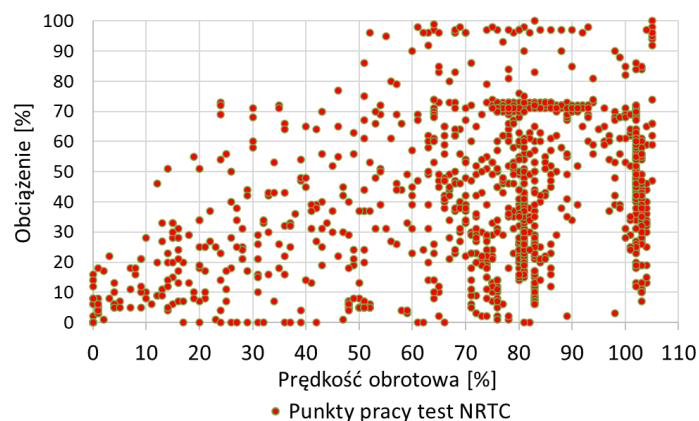
Tab. 3.11. Cykle badania NRSC w odniesieniu do silników kategorii RLL, RLR oraz NRE, punkty prędkości/momentu obrotowego i współczynniki wagowe (%) cykli ISO 8178 dla silników przeznaczenia kolejowego (na podstawie [65])

| Punkt pracy       | 1         | 2  | 3  | 4  | 5  | 6         | 7  | 8  | 9  | 10 | 11          |
|-------------------|-----------|----|----|----|----|-----------|----|----|----|----|-------------|
| Obciążenie (%)    | 100       | 75 | 50 | 25 | 10 | 100       | 75 | 50 | 25 | 10 | 0           |
| Prędkość obrotowa | Nominalna |    |    |    |    | Pośrednia |    |    |    |    | Bieg jałowy |
| Cykl C1           | 15        | 15 | 15 | -  | 10 | 10        | 10 | 10 | -  | -  | 15          |
| Cykl D2           | 5         | 25 | 30 | 30 | 10 | -         | -  | -  | -  | -  | -           |
| Cykl F            | 15        | -  | -  | -  | -  | -         | -  | 25 | -  | -  | 60          |
| Cykl G2           | 9         | 20 | 29 | 30 | 7  |           |    |    |    |    | 5           |

Po wprowadzeniu przepisów obowiązujących od normy Stage III B obligatoryjnym stało się również przeprowadzanie badań dynamicznych silników spalinowych do maszyn typu NRMM. Test dynamiczny Non-Road Transient Cycle (NRTC) jest dynamiczną charakterystyką pracy silnika przeprowadzaną na hamowni silnikowej o łącznym czasie trwania 1238 sekundy. W teście NRTC wykorzystuje się znormalizowaną prędkość obrotową i moment obrotowy silnika, który przedstawiono na rysunkach 3.6 i 3.7. Test NRTC przeprowadza się dwukrotnie, przy rozruchu zimnym silnika tzw. „cold start” oraz gdy silnik ma ustabilizowaną temperaturę płynu chłodzącego tj. rozruch gorący tzw. „hot start”. Pomiędzy dwoma badaniami następuje 20 minut przerwy, w których silnik jest kondycjonowany w stanie nagrzany [68]. Współczynniki ważenia (weighting factor) dla testu przy rozruchu zimnym silnika wynoszą 10% w Unii Europejskiej i 5% w Stanach Zjednoczonych. Moc średnia w teście wynosi około 37% maksymalnej mocy silnika. Test NRTC charakteryzuje się znaczną średnią wartością i zmiennością prędkości obrotowej i obciążenia. Ma to wpływ na dość szybkie osiągnięcie temperatur roboczych silnika oraz układów oczyszczania spalin.



Rys. 3.6. Znormalizowany test badawczy NRTC (na podstawie [68,79])



Rys. 3.7. Znormalizowane punkty pracy testu badawczego NRTC

Punkty pracy silnika określone w procentach, tj. prędkość obrotowa oraz obciążenie, dla testu NRTC w przypadku badań silnika muszą zostać zdenormalizowane indywidualnie dla każdej badanej jednostki. Wymagane jest zatem określenie kilku podstawowych wskaźników. Jednym z nich jest prędkość obrotowa odniesienia, wyliczana za pomocą wzoru 3.1.

$$n_{ref} = n_m + 0,95 \times (n_d - n_m) \quad (3.1)$$

gdzie:

$n_{ref}$  – prędkość obrotowa odniesienia: odpowiada 100 % wartości prędkości znormalizowanej podanej w programie cyklu na stanowisku hamulcowym,

$n_n$  – prędkość mała tj. najmniejsza prędkość, przy której silnik wytwarza 50 % mocy znamionowej,

$n_d$  – prędkość duża tj. największa prędkość, przy której silnik wytwarza 70 % mocy znamionowej.

Obliczona prędkość obrotowa odniesienia umożliwia następnie denormalizację prędkości obrotowej (3.2).

$$n = \frac{\%n_{nor} \times (n_{ref} - n_{jał})}{100} + n_{jał} \quad (3.2)$$

gdzie:

$n$  – rzeczywista prędkość obrotowa,

$n_{nor}$  – znormalizowana prędkość obrotowa,

$n_{jał}$  – prędkość biegu jałowego.

Wartości momentu obrotowego, obciążenia silnika, denormalizuje się za pomocą wzoru 3.3:

$$M = \frac{\%M_{nor} \times M_{max}}{100} \quad (3.3)$$

gdzie:

$M$  – rzeczywisty moment obrotowy,

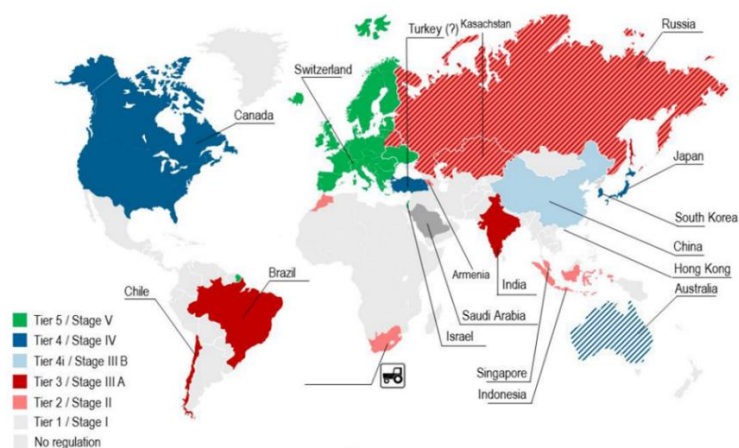
$M_{nor}$  – znormalizowany moment obrotowy,

$M_{max}$  – maksymalny moment obrotowy.

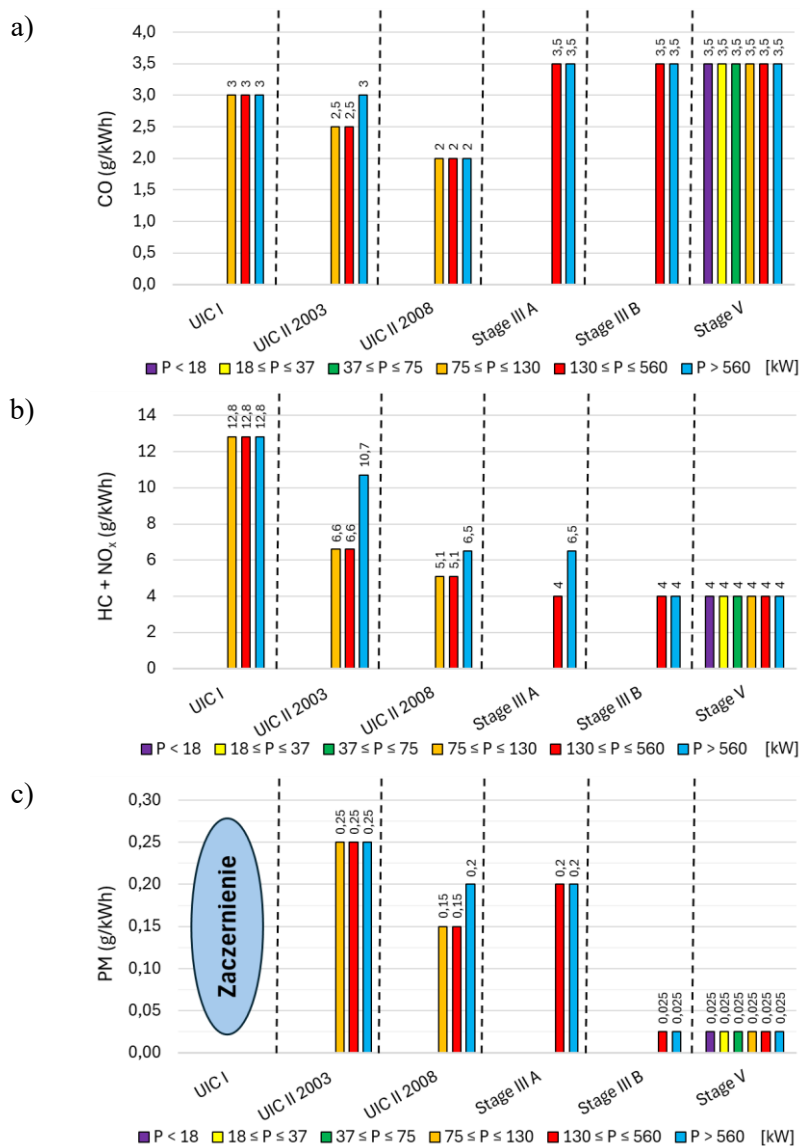
### 3.3. Odniesienie norm emisji spalin do pojazdów kolejowych

Na świecie aktualnie obowiązują lub wykorzystywane są dwa wiodące rodzaje norm emisji spalin dotyczące silników do pojazdów typu NRMM. Pierwszym z nich są omówione w podrozdziale 3.2 normy emisji spalin Stage obowiązujące w Europie. Drugim jest amerykański odpowiednik, tj. normy Tier, które są ustalane przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska (U.S. EPA - U.S. Environmental Protection Agency). W obu normach struktura jest do siebie bardzo zbliżona i podzielona na etapy. Przedstawione normy często są zapożyczane i wprowadzane w wielu krajach na świecie, tak jak to przedstawiono na rysunku 3.8. Poziom obowiązujących norm emisji spalin globalnie jest bardzo zróżnicowany. W Europie obowiązuje najbardziej rygorystyczna norma Stage V. W innych krajach również podejmowany jest wysiłek w ograniczaniu emisji spalin poprzez wprowadzanie coraz to bardziej wymagających norm. Pomimo tego, na świecie jest jeszcze wiele państw, w których nie obowiązują żadne unormowania prawne w tym obszarze. W szczególności w krajach rozwijających się zjawisko to jest bardzo powszechne. Wprowadzenie unormowań prawnych dotyczących norm emisji spalin w takich miejscach wydaje się być skomplikowanym i rozłożonym w czasie procesem, nie wspominając o próbie zrównania etapów norm emisji spalin globalnie.

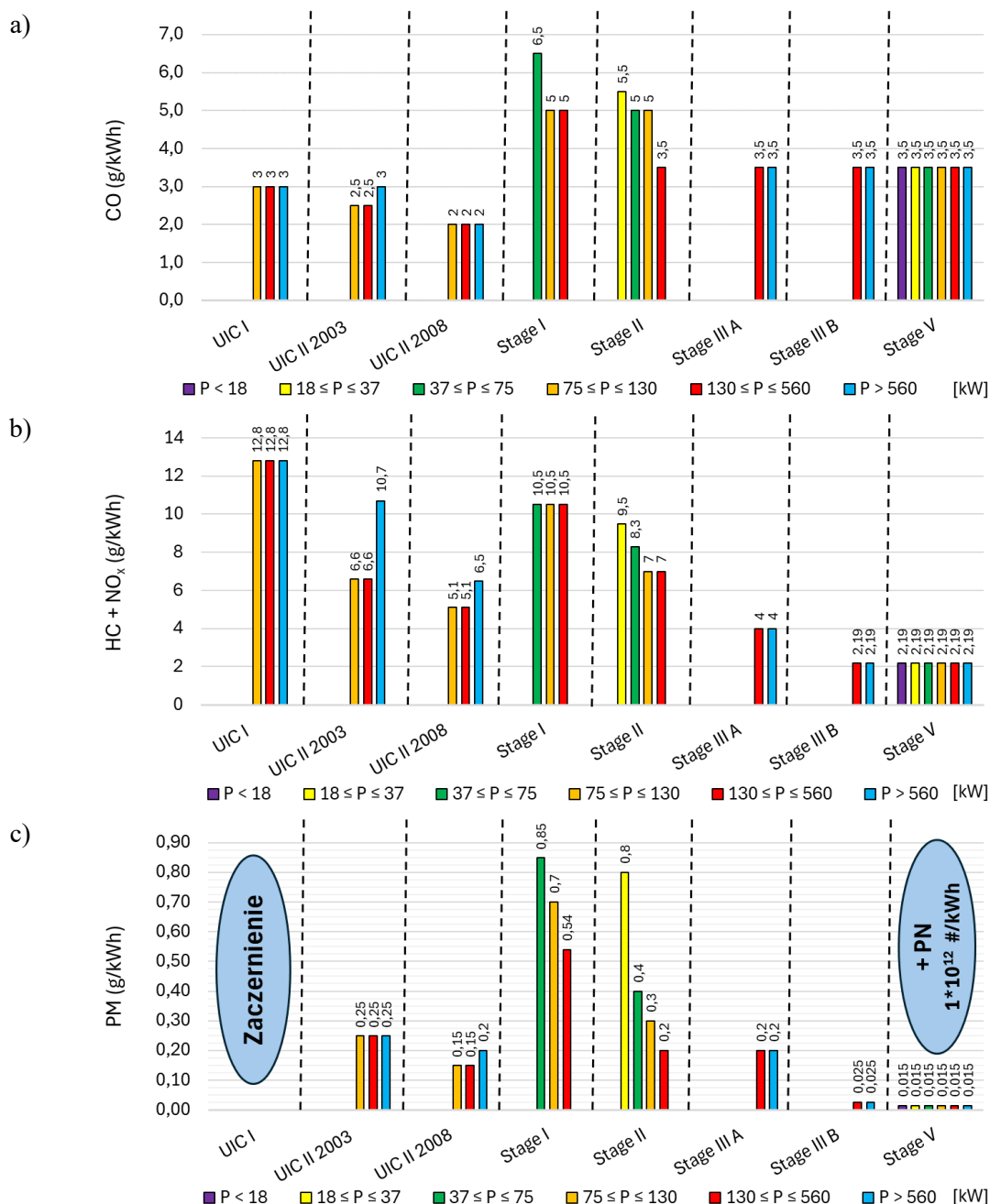
Potwierdzać wydaje się to proces wprowadzania norm emisji spalin obowiązujących na kolei. W przypadku spalinowych pojazdów szynowych, wykorzystywanych w Europie, próby limitowania wartości emisji spalin sięgają nawet początku lat 80' XX wieku. Od tego czasu doszło do wielu zmian poprzez wprowadzanie kolejnych unormowań prawnych z tego obszaru. Potwierdzają to zmiany w dopuszczalnych wartościach emisji spalin związków toksycznych, przedstawione na przykładzie klasycznej lokomotywy spalinowej (Rys. 3.9) oraz wagonu silnikowego (Rys. 3.10).



Rys. 3.8. Normy emisji spalin dla pojazdów typu NNRM na świecie [80,81]



Rys. 3.9. Przykładowe zestawienie wartości granicznych emisji związków toksycznych spalin wybranych norm emisji spalin dla klasycznej lokomotywy spalinowej w zależności od mocy silnika: a) tlenek węgla (CO), b) przykładowo zsumowane wartości emisji węglowodorów (HC) z tlenkami azotu (NO<sub>x</sub>), c) cząstki stałe (PM). \* Dla UIC moc silnika >100 kW



Rys. 3.10. Przykładowe wartości graniczne emisji związków toksycznych spalin wybranych norm emisji spalin dla spalinowego wagonu silnikowego (railcar) w zależności od mocy silnika: a) tlenek węgla (CO), b) przykładowo zsumowane wartości emisji tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) i węglowodorów (HC) c) cząstki stałe (PM). \* Dla UIC moc silnika > 100 kW

W obu przypadkach pojazdów widoczne są zmiany w dopuszczalnych wartościach emisji związków szkodliwych na przestrzeni lat. O ile wartości CO nie uległy znacznym zmianom lub wręcz pozostały na tym samym poziomie od kilku etapów wprowadzonych norm, tak emisja HC, NO<sub>x</sub> oraz PM uległy znacznemu ograniczeniu. Powodem jest ich bardzo negatywne oddziaływanie na środowisko. Rozpatrując przykładowo różnice między UIC I i Stage V dla zsumowanych HC oraz NO<sub>x</sub>, wartości dopuszczalne tych związków ograniczono trzykrotnie dla lokomotyw (12,8 g/kWh → 4 g/kWh) oraz niemal sześciokrotnie dla wagonów silnikowych (12,8 g/kWh → 2,19 g/kWh).

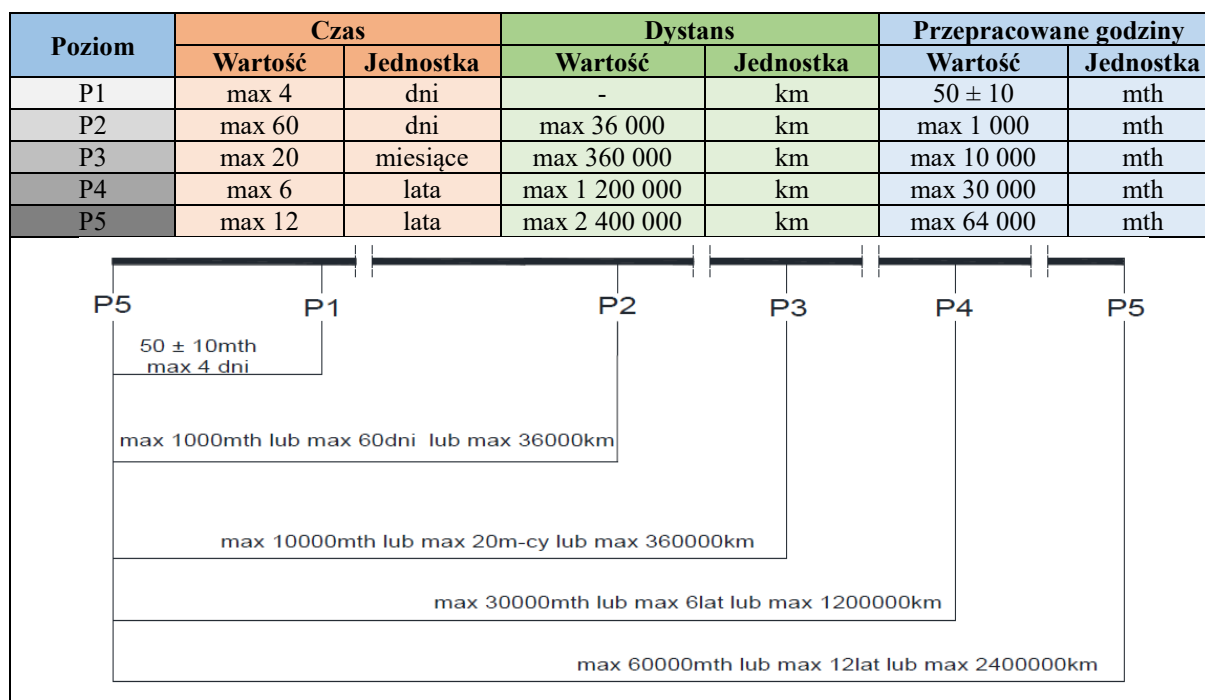
Największe zmiany dotyczą emisji cząstek stałych. Początkowo w przypadku UIC I badane było zaczernienie spalin. Następnie zmieniony został sposób weryfikacji emisji cząstek stałych na pomiar emisji jednostkowej (g/kWh). Dla lokomotyw pierwszą tego typu regulacją była UIC II

z 2003 roku, gdzie dopuszczalna wartość wynosiła 0,25 g/kWh. Od tego czasu ograniczono o 90% wartości dopuszczalne emisji PM do 0,025 g/kWh. W przypadku wagonów silnikowych zmiany są jeszcze większe, rozpatrując różnice między Stage I i Stage V. Limit emisji PM w Stage I w zależności od przedziału mocy był następujący:  $37 \text{ kW} \leq P < 75 \text{ kW} = 0,85 \text{ g/kWh}$ ,  $75 \text{ kW} \leq P < 130 \text{ kW} = 0,7 \text{ g/kWh}$ ,  $130 \text{ kW} \leq P < 560 \text{ kW} = 0,54 \text{ g/kWh}$ . Aktualnie dla normy Stage V wartość dopuszczalna dla wagonów silnikowych wynosi 0,015 g/kWh. Oznacza to, że dla silników w danych przedziałach mocy nastąpiła następująca redukcja dopuszczalnych wartości emisji PM:  $37 \text{ kW} \leq P < 75 \text{ kW} = -98,2\%$ ;  $75 \text{ kW} \leq P < 130 \text{ kW} = -97,9\%$ ;  $130 \text{ kW} \leq P < 560 \text{ kW} = -97,2\%$ . Dodatkowo, dla normy Stage V wprowadzony został obowiązkowy pomiar liczby cząstek stałych, którego limit wynosi  $1 \times 10^{12} \text{ \#/kWh}$ .

### 3.4. Utrzymanie pojazdów szynowych w Polsce i stan jednostek napędowych

Pojazdy szynowe ze względu na obowiązujące regulacje muszą być obsługiwane i utrzymywane w wymagany i wcześniej zaplanowany sposób. Przedsiębiorstwa kolejowe są z tego powodu zobligowane do posiadania Dokumentacji Systemu Utrzymania taboru kolejowego (DSU). System utrzymania jest złożonym i sformalizowanym procesem postępowania, który mówi w jaki sposób należy eksploatować i utrzymywać pojazd kolejowy [82]. Przedsiębiorca kolejowy, wraz z producentem taboru, jest zobligowany do opracowania DSU dla danego typu pojazdu. Dokument ten musi odpowiadać warunkom eksploatacji danego przewoźnika. Oznacza to, że ten sam typ pojazdu może posiadać różne DSU w zależności od przewoźnika lub charakteru eksploatacji pojazdu. Dodatkowo, przedsiębiorstwa kolejowe posiadają znaczną autonomię w ustalaniu zasad i sposobu eksploatacji i utrzymania pojazdów. Jednocześnie są w pełni odpowiedzialne za ich bezpieczną eksploatację [83].

W Polsce sposobem utrzymania, który można spotkać najczęściej jest pięciopoziomowy cykl utrzymania, w którym występuje podział ze względu na tzw. utrzymanie lekkie (P1, P2, P3) oraz ciężkie (P4, P5) (Tab. 3.12). System ten jest oparty na przedziałach, gdzie po osiągnięciu punktów granicznych pojazd musi odbyć dany poziom utrzymania. Przegląd należy wykonać według parametru czasu, przejechanego dystansu lub przepracowanych godzin (mth), w zależności od tego, który z wymienionych parametrów zostanie osiągnięty najwcześniej. Wartości te są szacowane zazwyczaj na podstawie zakładanych danych eksploatacyjnych pojazdów np. przebiegu dobowego lub średniego dobowego czasu pracy pojazdu. Przykładowe zestawienie cykli utrzymania P1–P5 zostało przedstawione na rysunku 3.11.



Rys. 3.11. Przykładowy pięciopoziomowy cykl utrzymania taboru kolejowego [84]

Tab. 3.12. Opis poziomów utrzymania pojazdu kolejowego wraz z przykładowymi czynnościami [84]

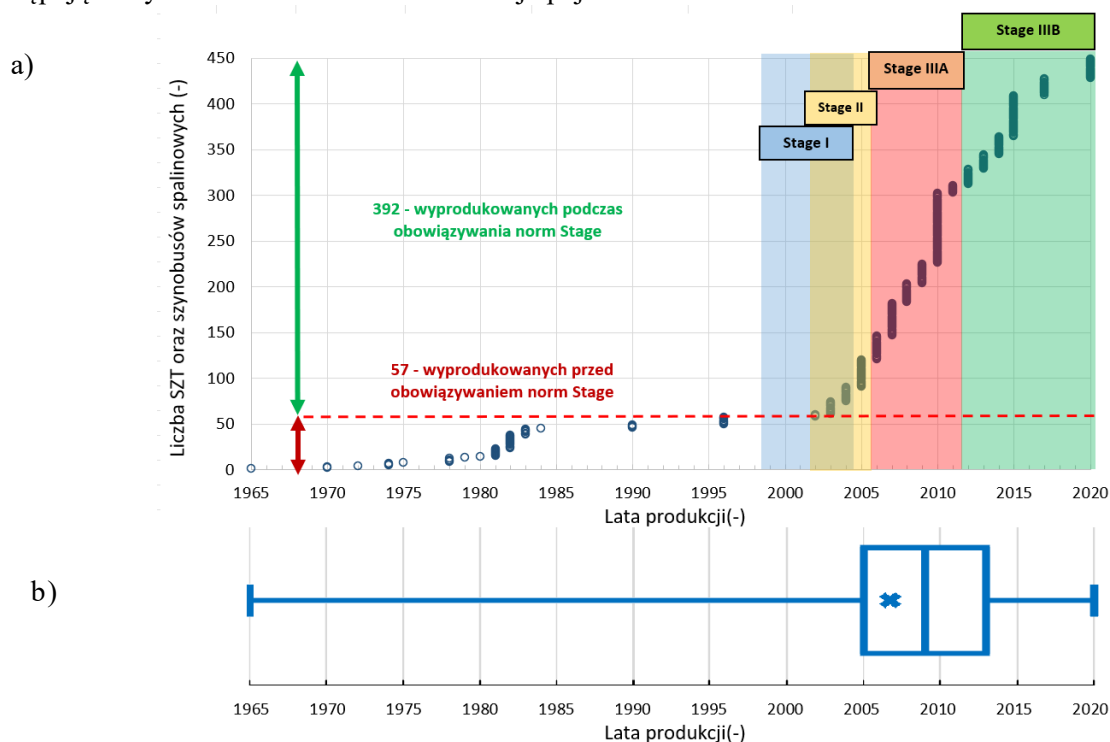
| Poziom  | Opis                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lekkie  | <p><b>P1</b></p> <p>Przegląd kontrolny. Obejmuje czynności sprawdzające lub monitoring dokonywane przed wyjazdem pojazdu kolejowego na linię, w czasie jazdy lub po zjeździe pojazdu. Niektóre z tych czynności mogą być wykonywane przez pracowników przewoźnika (maszynistę, rewidenta) lub przy użyciu automatycznych urządzeń pokładowych lub przytorowych.</p> <p>Zakres czynności wykonywanych cyklicznie i mający na celu przygotowanie pojazdu do użytkowania połączony z:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- oceną stanu zasadniczych zespołów i układów pojazdu, związanych z bezpieczeństwem ruchu i bezawaryjną pracą,</li> <li>- zaopatrzeniem pojazdu w materiały eksploatacyjne,</li> <li>- wymianą określonych elementów zużywających się eksploatacyjnie.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|         | <p><b>P2</b></p> <p>Przegląd okresowy. Obejmuje czynności, które zapobiegają przekroczeniom limitów zużycia, wykonywane na specjalistycznych stanowiskach, w przerwach między kolejną planowaną eksploatacją pojazdu kolejowego.</p> <p>Zakres czynności wykonywanych cyklicznie i mający na celu sprawdzenie stanu technicznego pojazdu szynowego ze szczególnym uwzględnieniem układów:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- biegowego,</li> <li>- ciąglowo – zderzakowego,</li> <li>- hamulcowego,</li> </ul> <p>połączony z:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- naprawą stwierdzonych zużyć i uszkodzeń,</li> <li>- wymianą części których stan techniczny nie gwarantuje bezpiecznej, bezawaryjnej eksploatacji do następnego przeglądu lub naprawy,</li> <li>- smarowanie wszystkich połączeń ruchowych,</li> <li>- poprawą powłok ochronnych oraz znaków i napisów,</li> <li>- próbą odbiorczą.</li> </ul> <p>Zakres czynności może zostać uzupełniony lub rozszerzony o czynności wymagane specyfiką pojazdu i ujęte w Dokumentacji Techniczno-Ruchowej (DTR) pojazdu.</p> |
|         | <p><b>P3</b></p> <p>Przegląd poszerzony. Obejmuje czynności z zakresu utrzymania, które zapobiegają przekroczeniom limitów zużycia, wykonywane na specjalistycznych stanowiskach, z wyłączeniem pojazdu kolejowego z planowanej eksploatacji.</p> <p>Zakres czynności wykonywanych cyklicznie i mający na celu przygotowanie pojazdu do użytkowania połączony z:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- szczegółową oceną stanu technicznego pojazdu przez sprawdzenie działania obwodów, oględziny dostępnych także po demontażu określonych w dokumentacji podzespołów, a także przewidziane w dokumentacji badania diagnostyczne,</li> <li>- planową wymianą podzespołów oraz o małym zakresie naprawy zespołów i podzespołów funkcjonalnych wykonywane na wyspecjalizowanych stanowiskach.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Ciężkie | <p><b>P4</b></p> <p>Naprawa rewizyjna. Obejmuje czynności wykonywane z zakresu utrzymania naprawczego wykonywane w Zakładach posiadających zaplecze techniczne i stanowiska pomiarowe.</p> <p>Zakres czynności których celem jest doprowadzenie pojazdu, jego zużytych lub uszkodzonych elementów, podzespołów i zespołów do stanu przewidzianego w Warunkach Technicznych Odbioru (WTO) oraz DTR pojazdu lub w jego dokumentacji konstrukcyjnej.</p> <p>Naprawa obejmuje:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- demontaż maszyn, urządzeń, zespołów, podzespołów i elementów,</li> <li>- oczyszczenie z brudu, smaru i korozji,</li> <li>- weryfikację maszyn, urządzeń, zespołów, podzespołów i elementów,</li> <li>- naprawę względnie wymianę maszyn, urządzeń, zespołów, podzespołów i elementów nie spełniających kryteriów,</li> <li>- malowanie i montaż pojazdu,</li> <li>- próbę odbiorczą zakończoną protokołem odbioru</li> </ul>                                                                                                                                                 |
|         | <p><b>P5</b></p> <p>Naprawa główna lub modernizacja. Obejmuje czynności mające na celu podniesienie standardu pojazdu kolejowego lub jego odnowienie wykonywane w specjalizowanych Zakładach lub u producenta.</p> <p>Zakres czynności jak w P4, uzupełniony lub rozszerzony o czynności wymagane specyfiką pojazdu i ujęte w DTR pojazdu.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

W przypadku spalinowych jednostek napędowych w taborze kolejowym, przechodzą one utrzymanie tzw. lekkie, gdzie planowane są takie działania jak np. wymiana wtryskiwaczy lub turbosprężarki. Jednakże najbardziej istotnymi poziomami utrzymania jest utrzymanie ciężkie tj. P4 i P5. Podczas tego procesu silnik spalinowy musi zostać zdemonstrowany z pojazdu i przejść przegląd generalny, wykonany u producenta silnika lub autoryzowanego przedstawiciela. Podobnie sprawa wygląda z układami oczyszczania spalin. Po przeprowadzonej naprawie silnik spalinowy jest montowany z powrotem na pojeździe. Wymiana jednostki napędowej w pojeździe następuje jedynie

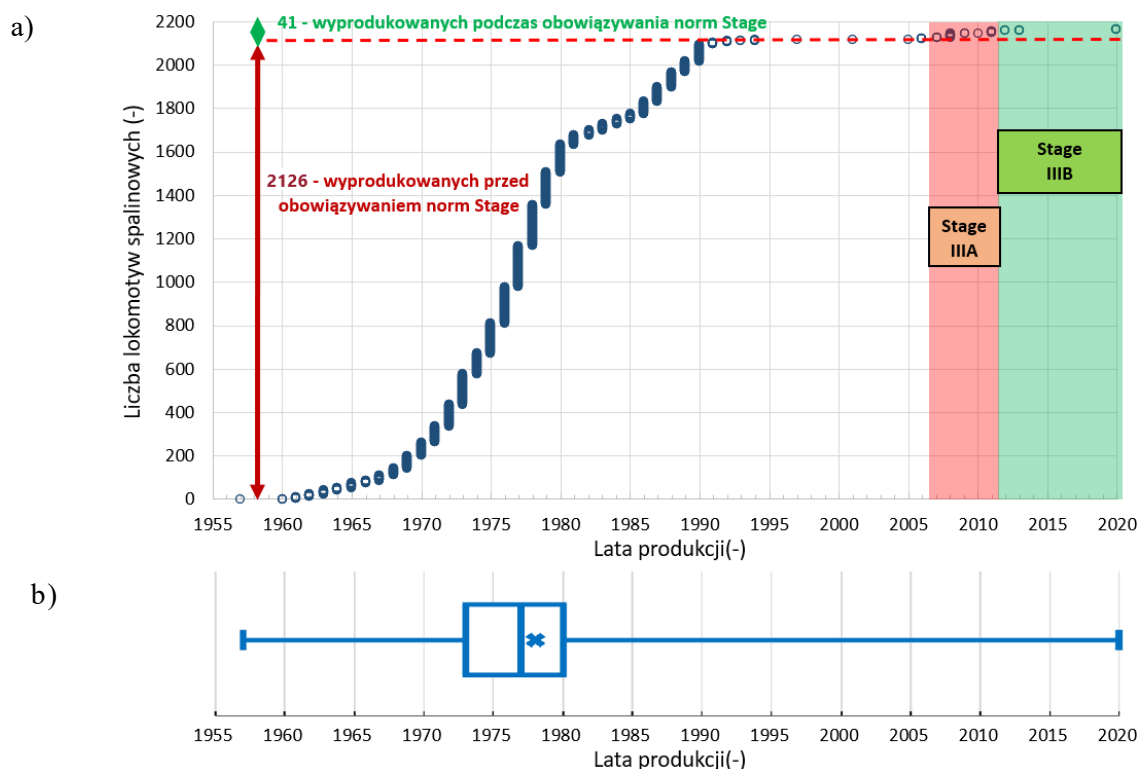
w przypadku bardzo złego stanu technicznego, który nie pozwala na dalszą eksploatację lub podczas modernizacji pojazdu. Oznacza to, że w większości przypadków, gdy pojazd przechodzi utrzymanie ciężkie, ten sam silnik może być wykorzystywany w dalszym ciągu. Często oznacza to, że pomimo naprawy głównej (P5), do której dochodzi w zależności od pojazdu co około 10–14 lat, wykorzystywane są wciąż te same silniki spalinowe homologowane zgodnie z wymaganiami obowiązującymi sprzed wielu lat.

Dokładne oszacowanie liczby pojazdów posiadających te same silniki spalinowe od momentu ich wyprodukowania i dopuszczenia do służby jest mocno utrudnione. Wpływ na to ma wiele czynników, między innymi ograniczona dostępność danych statystycznych, danych serwisowych pojazdów, zmiennych oraz nieprzewidywalnych warunków eksploatacji i bezawaryjnej służby. Dodatkowo, wiele przedsiębiorstw posiada pojazdy, które nie są eksploatowane na liniach kolejowych PKP, co oznacza, że nie muszą posiadać dopuszczenia do poruszania się po państwowych szlakach kolejowych. Z tego powodu, nie są wpisane do rejestru pojazdów kolejowych.

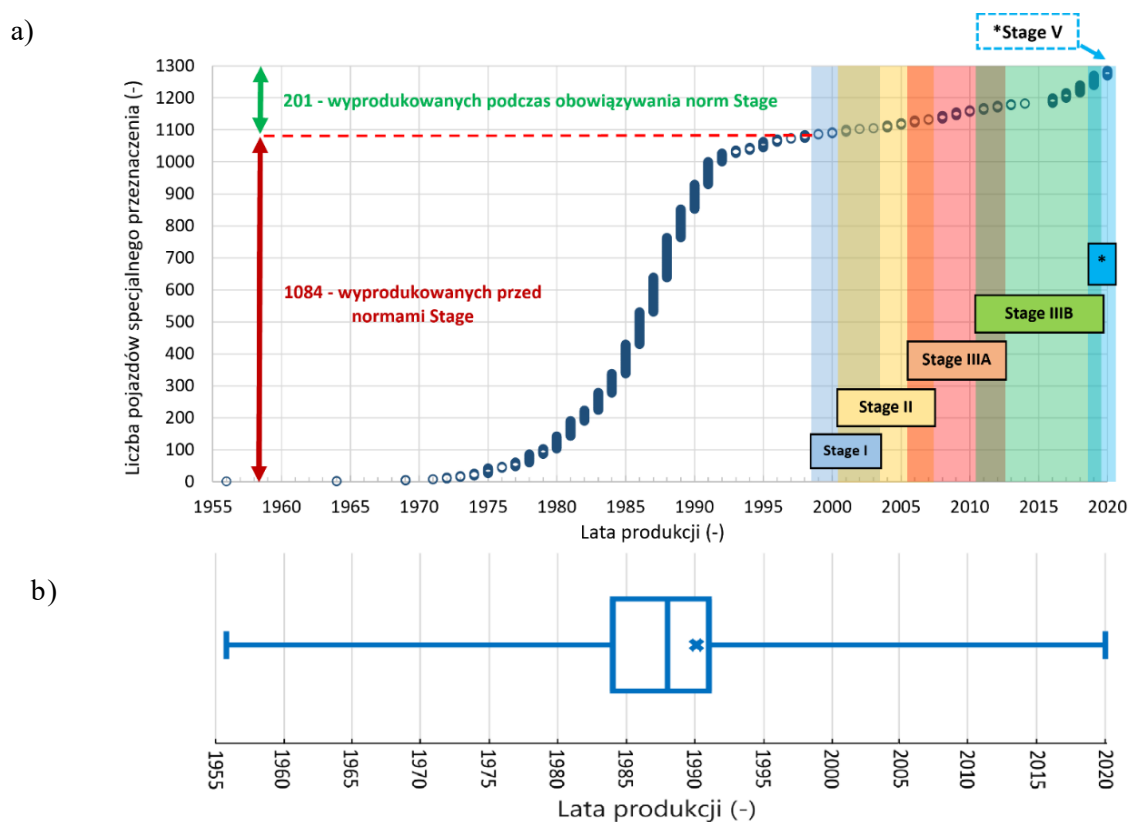
Na rysunkach 3.12-3.14 przedstawione zostały zestawienia poszczególnych grup spalinowych pojazdów szynowych, wpisanych do Krajowego Rejestru Pojazdów Kolejowych NRV [55], w kontekście ich roku produkcji i obowiązujących dla danej grupy pojazdów normy Stage. W przypadku SZT oraz szynobusów spalinowych (Rys. 3.12) według danych z 2021 roku zdecydowana większość, spośród 449 sztuk gdzie w zestawieniu wliczały się zarówno pojazdy trakcyjne jak i wagony, została wyprodukowana w latach obowiązywania normy emisji spalin Stage IIIA (2006–2011) oraz Stage IIIB (2012–2020). Potwierdzają to dane statystyczne (Rys. 3.12b), gdzie przedział pomiędzy pierwszym i trzecim kwartylem zawiera się w latach 2005-2013. W przypadku Stage I i Stage II zaznaczony obszar nachodzi na siebie ze względu na różne daty obowiązywania normy z powodu kategorii (mocy silnika). Dla 57 pojazdów okres produkcji przypadł przed obowiązywaniem norm emisji Stage, tj. przed 1999 rokiem, z czego najstarszy egzemplarz pochodzi z 1965 roku. Znając cykl utrzymania pojazdów szynowych można przyjąć, że rok produkcji pojazdu to również rok produkcji (a właściwie montażu) silnika. Przy takim założeniu pomijana jest dość rzadko występująca wymiana silnika oraz modernizacja pojazdu.



Rys. 3.12. Charakterystyka spalinowych zespołów trakcyjnych oraz szynobusów spalinowych w Polsce w 2021 roku: a) lata produkcji pojazdów w odniesieniu do norm emisji spalin Stage, b) statystyki ogólne (25-ty i 75-ty percentyl, wykres pudełkowy; mediana, linia środkowa; średnia, krzyżyk; maksimum i minimum, wąsy) (na podstawie [55,83])



Rys. 3.13. Charakterystyka lokomotyw spalinowych w Polsce w 2021 roku: a) lata produkcji w odniesieniu do norm Stage, b) statystyki ogólne (25-ty i 75-ty percentyl, wykres pudełkowy; mediana, linia środkowa; średnia, krzyżyk; maksimum i minimum, wąsy) (na podstawie [55])



Rys. 3.14. Charakterystyka trakcyjnych pojazdów specjalnych w Polsce w 2021 roku: a) lata produkcji w odniesieniu do norm Stage, b) statystyki ogólne (25-ty i 75-ty percentyl, wykres pudełkowy; mediana, linia środkowa; średnia, krzyżyk; maksimum i minimum, wąsy) (na podstawie [55])

Dla silników lokomotyw, do 2021 roku, gdy zaczęły obowiązywać normy Stage V, jedynymi normami emisji spalin Stage były Stage IIIA oraz Stage IIIB. Dla Stage IIIA lata obowiązywania to 2007-2011 dla Kategorii RL A ( $130 \text{ kW} \leq P \leq 560 \text{ kW}$ ) oraz 2009-2011 dla Kategorii RH A ( $P > 560 \text{ kW}$ ). Dla Stage IIIB były to lata 2012-2020 (Kategoria R B). W przypadku 2167 lokomotyw spalinowych w Polsce w 2021 roku, uwzględnionych w danych UTK [55], jedynie 41 lokomotyw było wyprodukowanych w okresie obowiązywania norm Stage dla silników lokomotyw (Rys. 3.14a). Jest to mniej niż 1,9% wszystkich lokomotyw spalinowych w Polsce. Dla tej grupy pojazdów średni rok produkcji przypadł na 1978 rok, a mediana to 1977 rok. Połowa produkcji lokomotyw spalinowych użytkowanych w Polsce przypadła na lata 1973-1980 (kwartyl dolny oraz kwartyl górny) (Rys. 3.14b). W opisywanym przypadku znaczny wiek lokomotyw spalinowych może mieć znaczący wpływ na stan silników spalinowych.

W przypadku pojazdów specjalnych z napędem spalinowym, normy Stage zaczęły obowiązywać od 1999 roku. W 2021 roku w Polsce użytkowanych było 201 spalinowych pojazdów specjalnych wyprodukowanych w latach obowiązywania norm Stage. Należy jednak pamiętać, że wszystkich tego typu pojazdów w Polsce było 1285, co oznacza, że udział pojazdów wyprodukowanych w latach obowiązywania norm Stage wynosił 15,6% (Rys. 3.15a). Pozostałe 1084 pojazdy zostały wyprodukowane przed 1999 rokiem. Mediana roku produkcji tego typu pojazdów to 1988 rok, a średnia to 1990 rok. Połowa pojazdów z opisywanej grupy została wyprodukowana w latach 1984-1991 (kwartyl dolny oraz kwartyl górny) (Rys. 3.15b). Pomimo tego, że względem lokomotyw spalinowych, średni wiek tych pojazdów w 2021 roku był niemal o 12 lat mniejszy, to jest to wciąż znacząca wartość w kontekście podwyższonej emisyjności. Pojazdy te wykorzystują stare technologie, które nie są dostosowane do dzisiejszych wymagań.

Biorąc pod uwagę przeprowadzane modernizacje i remotyzyacje, tj. wymianę silnika na pojazdach szynowych, zapewne część pojazdów jest wyposażona w silniki spalinowe spełniające normy emisji spalin Stage, jednakże oszacowanie tej wartości jest mocno utrudnione. Należy jednak pamiętać o wykorzystywanym przez przewoźników systemie utrzymania pojazdów, który nie uwzględnia cyklicznych wymian silników na nowe bez wyraźnego powodu. Dodatkowo, przedstawione lata produkcji pojazdów mogą świadczyć o tym, że pojazdy mogły przejść już kilka cykli utrzymaniowych, jednak wykorzystywane w nich silniki spalinowe mogą pozostawać te same od momentu ich fabrycznego zamontowania. Oznacza to, że w znacznej części pojazdów mogą być wciąż wykorzystywane silniki spalinowe odznaczające się znacznym stopniem zużycia, znacznym wiekiem oraz silniki te mogą generować znaczne wartości emisji związków toksycznych spalin. Sytuacja taka może mieć bardzo negatywny wpływ na środowisko oraz ludzi znajdujących się w pobliżu pracujących pojazdów.

## 4. Analiza udziałów czasu pracy pojazdów szynowych

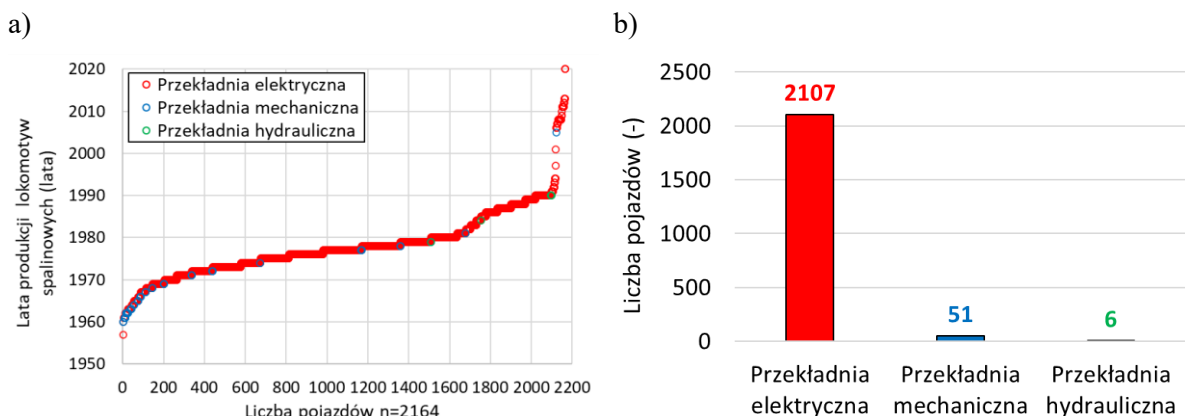
### 4.1. Czynniki wpływające na parametry pracy

Spalinowe pojazdy szynowe, można podzielić ze względu na rodzaj układu napędowego, a dokładniej na zastosowaną przekładnię. Podstawowymi rodzajami przekładni są:

- przekładnia elektryczna,
- przekładnia hydrauliczna,
- przekładnia mechaniczna.

Zastosowanie przekładni elektrycznej wynika głównie z zapotrzebowania na moc trakcyjną pojazdu, która - w szczególności przy ruszaniu i niskich prędkościach pojazdu - musi być odpowiednio duża. Pozwala to na bardziej dynamiczne pokonywanie oporów toczenia i korzystniejsze warunki jezdne. Układ napędowy w tego typu pojazdach pracuje w szeregowym układzie hybrydowym, gdzie silnik spalinowy napędza prądnicę. Zespół prądotwórczy wytwarza w ten sposób energię elektryczną, która poprzez układ energoelektroniczny trafia do silników trakcyjnych napędzających osie pojazdu.

Zaletą tego typu rozwiązań jest duży moment obrotowy silnika elektrycznego, dostępny od niskich prędkości obrotowych. Rozwiązanie to jest szczególnie popularne w lokomotywach spalinowych [42,43,53], których głównym przeznaczeniem jest ciągnięcie składów wagonów, w tym bardzo ciężkich towarowych. W 2020 roku w Polsce było 2107 lokomotyw spalinowych z przekładnią elektryczną, co stanowiło 97,2% wszystkich lokomotyw (Rys. 4.1.) [55]. W zespołach prądotwórczych zapotrzebowanie na moc jest regulowane poprzez zmienne obciążenie silnika spalinowego oraz prędkość obrotową przy prądnicach ze zmienną prędkością pracy. Zadanie obciążenia w zależności od potrzeby jest sterowane poprzez tzw. nastawniki jazdy. Nastawniki posiadają kilka pozycji pracy, w zależności od pojazdu, gdzie każdej pozycji odpowiada praca silnika w zadanym zakresie dostępnej mocy [85,86].



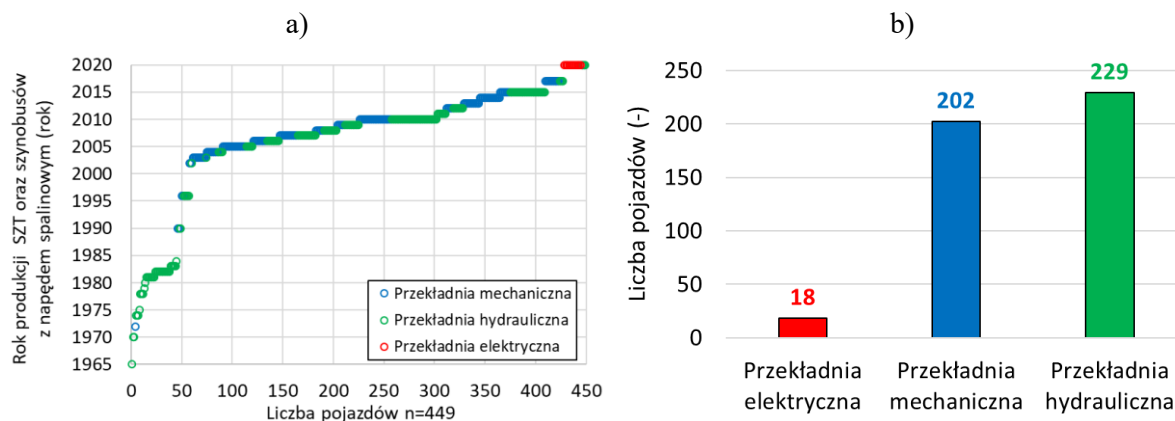
Rys. 4.1. Podział lokomotyw spalinowych w Polsce ze względu na rodzaj przekładni:

a) lata produkcji, b) liczba pojazdów (na podstawie [55])

W przypadku spalinowych zespołów trakcyjnych oraz szynobusów widoczny jest w ostatnich latach trend dotyczący stosowania przekładni elektrycznych (Rys. 4.2a) [81]. Pasażerscy przewoźnicy kolejowi, w celu zwiększenia efektywności przewozowych na liniach niezelektryfikowanych, sięgają po pojazdy z większą liczbą miejsc. Przekłada się to na zapotrzebowanie na pojazdy większych rozmiarów, rozbudowane o dodatkowe człony. W ten sposób rekompensowane jest zapotrzebowanie na duży moment obrotowy przy niskich prędkościach obrotowych. Dodatkowo dynamika pojazdu również się poprawia. Jednakże udział pojazdów tego typu z przekładnią elektryczną jest dość niski i w 2020 roku wynosił 4% przy 18 sztukach pojazdów (Rys. 4.2b).

O wiele bardziej popularnym rozwiązaniem w pojazdach pasażerskich jest stosowanie przekładni mechanicznej oraz hydraulicznej. W 2020 roku w tego typu przekładni było wyposażonych kolejno 202 szt. (45%) i 229 szt. (51%) szynobusów i SZT. Przekładnie tego typu są stosowane również w pojazdach specjalnych, jednak ich dokładna liczba jest ciężka do oszacowania. Zaletą przekładni hydraulicznych jest to, że są bezstopniowe. W przypadku przekładni mechanicznej, parametry jezdne

pojazdu są ściśle powiązane z parametrami pracy silnika spalinowego oraz liczbą biegów i aktualnym stopniem przełożenia. W niektórych rozwiązaniach, jak np. w wózkach motorowych WM-15A, pojazd prowadzi się w podobny sposób jak konwencjonalny samochód z manualną skrzynią biegów. Zaletą stosowania przekładni mechanicznych jest najmniejszy stopień skomplikowania spośród wymienionych typów przekładni oraz niska cena. Dodatkowo nie ma potrzeby stosowania układu sterującego, jak w przypadku przekładni elektrycznych. Z tego powodu, mechaniczne przełożenie jest popularnym rozwiązaniem dla mniejszych pojazdów szynowych.



Rys. 4.2. Podział SZT oraz szynobusów w Polsce ze względu na rodzaj przekładni:  
a) lata produkcji, b) liczba pojazdów (na podstawie [55])

Od rodzaju zastosowanej przekładni w dużej mierze zależą parametry pracy pojazdu jak i silnika spalinowego. Istotnym czynnikiem jest również rodzaj i przeznaczenie pojazdu. Tabor kolejowy jest projektowany dla konkretnego zastosowania i wymogów eksploatacyjnych zamawiającego pojazdu. Najbardziej charakterystycznym rodzajem pracy jest wykonywanie przewozów na liniach kolejowych tj. praca liniowa. Nie mniej ważnym jest praca związana z formowaniem i rozformowaniem składów wagonów. Rodzajów takich działań jest kilka, jednakże na potrzeby pracy można je skategoryzować jako prace manewrowe. Dodatkowo, są też prace bardzo indywidualne, które wykonują jedynie wyspecjalizowane pojazdy takie jak pojazdy specjalne. Z tego powodu rodzaj wykonywanej pracy, do której pojazdy zostały skonstruowane, również będzie silnie wpływał na wskaźniki eksploatacyjne, w tym udziały czasu pracy.

Jednocześnie, identyczna praca wykonywana przez różne pojazdy, zaprojektowane do tego samego przeznaczenia, będzie się od siebie różnić i rzutować na zróżnicowane parametry eksploatacyjne. Ze względu na złożoność zagadnienia, ogólne scharakteryzowanie warunków pracy dla danej grupy pojazdów, czy dla rodzaju wykonywanych prac jest bardzo ciężkie. Często opisywane zagadnienia są mocno indywidualnym przypadkiem, który zależy od konkretnego pojazdu, miejsca pracy, czynników zewnętrznych lub nawet stylu jazdy maszynisty [87,88]. Jednakże analiza kilku osobnych przypadków umożliwia zauważenie pewnych trendów mogących pomóc w wyciągnięciu wniosków.

Najbardziej powszechnym źródłem danych, potrzebnych do statystycznego opisu pracy pojazdu szynowego lub silnika spalinowego, jest układ diagnostyczny. W pojazdach szynowych układem tym jest zazwyczaj magistrała CAN. Najbardziej miarodajne dane dotyczące udziałów czasu pracy zwykle dotyczą parametrów pracy silnika np. mocy lub też pozycji nastawnika podczas pracy. W przypadku badań lokomotyw to właśnie pozycja nastawnika jest bardzo często wykorzystywana do sprecyzowania charakteru eksploatacji pojazdu oraz stanowi dobry punkt odniesienia dla innych parametrów [89,90].

Wspomniane dane silnikowe, głównie moc silnika, są również bardzo miarodajnymi danymi, do których można odnieść wyemitowaną masę związków szkodliwych spalin czy określić sprawność pracy silnika [91,92]. Pomiary takich wskaźników, ze spalinowych pojazdów szynowych, w dużej mierze można przeprowadzić stacjonarnie np. na oporniku wodnym [93,94] lub zadać opór z silników trakcyjnych. Przypomina to nieco pomiary laboratoryjne lub homologacyjne, gdzie silnik spalinowy jest również badany stacjonarnie na hamowni silnikowej. Natomiast wciąż jest stosunkowo mało publikacji i badań, w których udziały czasu pracy dla pojazdów szynowych odnoszą się do parametrów przejazdowych pojazdu [95,96].

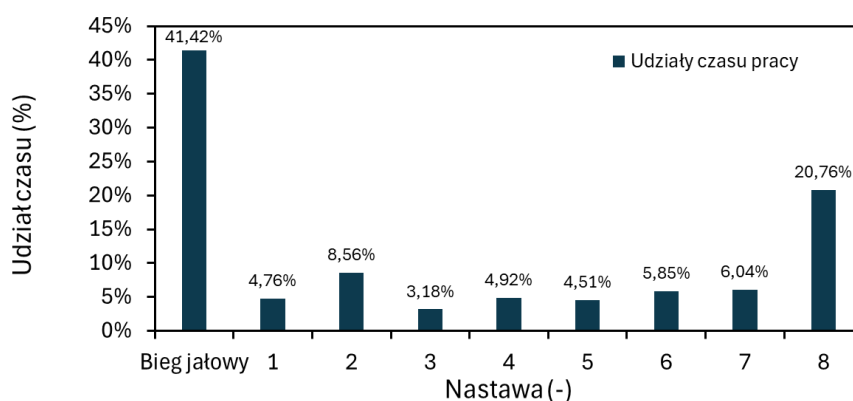
## 4.2. Udziały czasów pracy

### Lokomotywy liniowe

Docelowa rola transportu szynowego opiera się o przewóz pasażerów lub towarów. Rola ta jest realizowana na szlakach kolejowych, a lokomotywy wykonujące taką pracę nazywa się lokomotywami liniowymi. W celu analizy tego rodzaju prac przytoczone zostały publikacje, w których zawarte zostały informacje na temat badań dotyczących udziałów czasu pracy. W przypadku lokomotyw głównym wskaźnikiem pracy jest pozycja nastawnika, która definiuje głównie obciążenie silnika spalinowego.

W publikacji autorstwa Kim, Y. K. et al. (2017) [97] zostały przeprowadzone badania dotyczące udziałów czasu pracy lokomotyw na danej nastawie podczas przejazdów na liniach kolejowych w Korei Południowej. Badania te mają znaczną wartość ze względów statystycznych, ponieważ przebadana została znaczna grupa badawcza, która objęła 52 przejazdy na terenie całego kraju. Odległości tras wynosiły od 303 km do 578 km. Badaniom zostały poddane przejazdy, podczas których realizowane były przewozy zarówno pasażerskie jak i towarowe. Na podstawie bazy danych pozyskanych spośród wszystkich 52 przejazdów, obliczona została średnia ważona udziałów czasu pracy na danej nastawie (Rys. 4.3).

Pomimo wykorzystania lokomotyw liniowych, 42,4% czasu pracy pojazdy spędziły na biegu jałowym. Oznacza to, że największy udział czasu pracy dla opisywanych przejazdów stanowił postój pojazdów. Z kolei drugim największym udziałem czasu była praca na najwyższej, ósmej nastawie. Przez 20,8% czasu silnik spalinowy pracował na największym obciążeniu. Trzecią nastawą pod względem udziału czasu pracy była nastawa nr 2 (8,56%). Dla pozostałych nastaw udział zawierał się w przedziale od 3,18% do 6,04%. Prawdopodobnie celem podczas takich przejazdów było osiągnięcie możliwie szybko maksymalnej mocy lokomotywy, a w konsekwencji prędkości, z którą pojazd miał poruszać się po trasie. Z kolei znaczny udział pracy na biegu jałowym mógł być spowodowany przystankami dla pasażerów lub koniecznością postoju i przepuszczenia innych pojazdów ze względu na mniejszy priorytet dla przewozów towarowych.

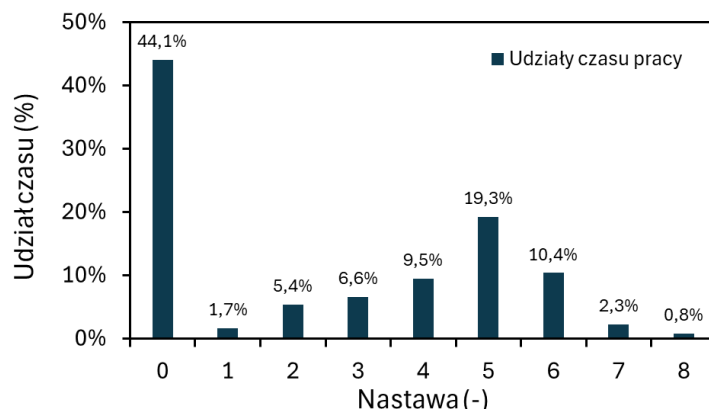


Rys. 4.3. Średnia ważona udziałów czasu pracy na danym nastawniku jazdy dla 52 lokomotyw na liniach kolejowych w Korei Południowej (na podstawie [97])

W innym badaniu, głównym celem pracy było przeprowadzenie kalkulacji dotyczących parametrów eksploatacyjnych lokomotywy CHME3 [98]. Lokomotywa docelowo jest przeznaczona do prac manewrowych, jednak zdarza się, że pojazdy są wykorzystywane do różnych rodzajów prac. W badaniach pojazd wykonywał prace eksportowe na terenie Ukrainy. Prawdopodobnie chodzi tu o realizację wyjazdu z bocznicy i przejazdu po linii kolejowej wraz z wagonami towarowymi. Świadczyć o tym może masa składu o wadze 500 ton.

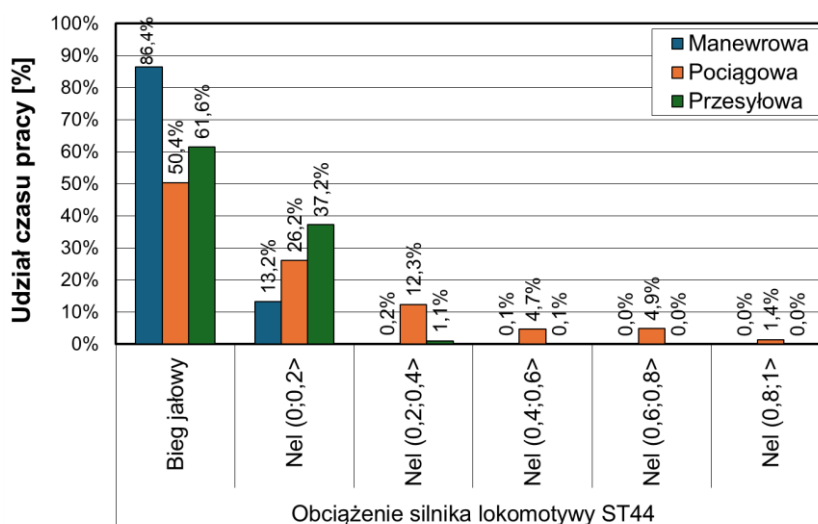
W odróżnieniu od poprzedniej publikacji, lokomotywa pracowała na najwyższej nastawie jedynie przez 0,8% czasu (Rys. 4.4). Natomiast w przypadku pracy na biegu jałowym, pojazd spędził 44,1% czasu. Wartość ta jest zbliżona do przytoczonego wcześniej artykułu. Największy udział czasu podczas jazdy odpowiadał nastawie nr 5 (19,3%). Na sąsiednich nastawach, tj. nr 4 i nr 6, pojazd pracował przez około 10% czasu. W publikacji nie zawarto informacji na temat prędkości przejazdu, jednak prace eksportowe mogły odbywać się przy małych lub umiarkowanych prędkościach

przejazdowych. Świadczy o tym mały udział pracy na najwyższych nastawach. Dodatkowo, przewozy towarowe bardzo często odbywają się z małą prędkością. W Polsce średnia prędkość przewozów towarowych w 2023 roku wyniosła 18,7 km/h [17].



Rys. 4.4. Zależność całkowitego udziału czasu pracy lokomotywy CHME3 od pozycji nastawnika podczas realizacji prac eksportowych [98]

W pracy Kortas i Kropiwnicki (2013) [99] przebadana została ciężka sześćosiowa lokomotywa ST44 na terenie Polski. Autorzy zamiast pozycji nastawnika przedstawili wyniki w postaci zakresów mocy (Rys. 4.5). Wykonane zostały trzy rodzaje prac: manewrowa, pociągowa i przesyłowa. Dla pracy pociągowej, tj. realizując przejazd po linii kolejowej z wagonami, silnik lokomotywy pracował przez połowę czasu na biegu jałowym, tj. 50,4%. W przypadku zakresów obciążenia silnika dla (0-0,2) oraz (0,2-0,4) mocy znamionowej lokomotywa pracowała w tych zakresach kolejno 26,2% oraz 12,3% czasu. Dla pozostałych obciążeń w zakresie (0,4-1) pojazd pracował jedynie przez 11% czasu, z czego dla maksymalnego zakresu jedynie przez 1,4%. Wraz ze zwiększającym się obciążeniem, z jednym wyjątkiem, udział czasu pracy malał. Lokomotywa, pomimo pracy pociągowej na linii kolejowej z wagonami, pracowała ze względnie małym obciążeniem. Może to świadczyć o dostępnej, dużej mocy silnika, stosunkowo małej masie składu wagonów lub niewymagającej trasie, po której pojazd poruszał się z małą prędkością.



Rys. 4.5. Średnia obciążenia silnika dla poszczególnych rodzajów pracy ciężkiej 6-osiowej lokomotywy ST44 w Polsce (na podstawie [99])

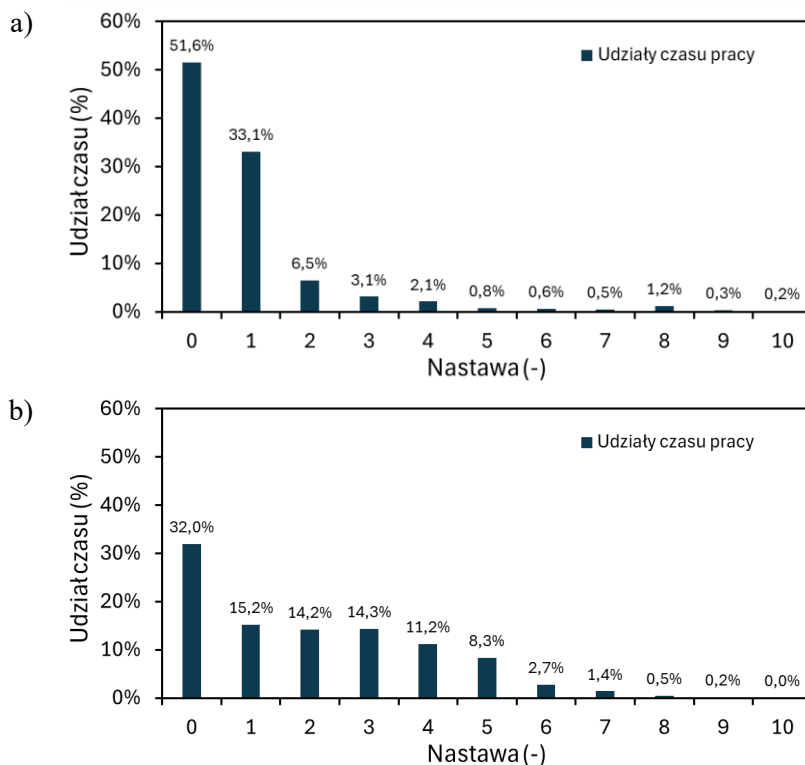
W przypadku pracy przesyłowej, czyli przejazdu lokomotywy po linii kolejowej bez wagonów np. w celu dojazdu do miejsca pracy, wykorzystany maksymalny zakres mocy znamionowej wyniósł (0,4-0,6). Dodatkowo udział czasu pracy w tym zakresie wyniósł 0,1%. Silnik pojazdu najdłużej

pracował na biegu jałowym (61,6%), co świadczy o licznych lub długich postojach na szlaku. Mogło być to spowodowane bardzo niskim priorytetem przejazdowym pojedynczego pojazdu. Silnik, podczas gdy pojazd był w ruchu, najczęściej pracował z obciążeniem w zakresie (0-0,2) mocy znamionowej. Dla pracy manewrowej średnie obciążenie silnika było jeszcze mniejsze. Silnik podczas tej pracy przez 86,4% czasu pracował na biegu jałowym. Można założyć, że jedynie przez 13,6% czasu pojazd był w ruchu. Na podstawie przytoczonych prac widoczne jest w jak bardzo zróżnicowany sposób mogą pracować pojazdy, które w teorii wykonują tę samą pracę.

### Lokomotywy manewrowe

Praca manewrowa jest wykonywana przez lokomotywy manewrowe. Lokomotywa wykorzystywana jest do prac rozrządczych, kompletowania pociągów, podstawiania wagonów na miejsca załadunku i ich odbioru, podstawiania i odbierania składów pasażerskich na perony i z peronów do punktów odstawczych, przemieszczania wagonów, grup wagonów i całych składów pociągów z jednego toru na drugi, podstawiania wagonów lub innych pojazdów kolejowych w celu wykonania dodatkowych czynności, takich jak czyszczenie, mycie, dezynfekcja, ważenie, naprawy [99].

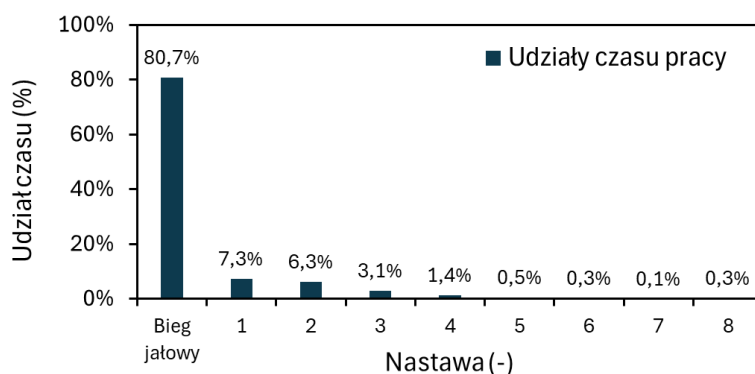
W pracy Andrzejewski, M. et al. (2018) [100] przeanalizowane zostały udziały czasu pracy silnika pojazdu pod względem wykonywanego rodzaju prac. Badanym obiektem była najliczniejsza lokomotywa manewrowa w Polsce, - SM42, o mocy 588 kW. Liczba nastaw w tym pojeździe była większa niż we wcześniejszych przypadkach i wynosiła 10 pozycji. Nastawa „0” oznacza pracę na biegu jałowym. Pierwszym rozpatrywanym rodzajem prac był ruch manewrowy (Rys. 4.6a). Największy udział czasu stanowiła praca na biegu jałowym (51,6%). Pomimo tego, że praca na nastawie nr 0 stanowiła ponad połowę czasu, wynik ten jest o 35 pp. niższy od przytoczonego wcześniej przykładu dotyczącego pracy manewrowej lokomotywy ST44. Być może w tym przypadku prace manewrowe były lepiej zorganizowane, co zwiększyło efektywność pracy pojazdu. Pojazd poruszał się na wszystkich nastawach, jednak praca na nastawach z zakresu od 0 do 4 stanowiła 96,4%, z czego 33,1% stanowiła praca na nastawie nr 1. Oznacza to, że wykonywana praca była lekka.



Rys. 4.6. Histogram obciążeń silnika spalinowego lokomotywy serii SM42 pracującej:  
a) wyłącznie w ruchu manewrowym, b) w ruchu manewrowym oraz na górcie rozrządowej [100]

Drugim analizowanym przypadkiem była praca w ruchu manewrowym oraz na górze rozrządowej (Rys. 6b). Praca na górze rozrządowej odbywa się na stacji rozrządowej równiowej z górką. Jest to stacja, na której wagony do rozrządzania są pchane przez lokomotywę manewrową na sztuczną górkę. Następnie z góry rozprężnięte wagony zjeżdżają na odpowiednie tory kierunkowe poprzez działanie siły grawitacji. Pierwsza część pracy wymaga od lokomotywy podjazdu pod nachylony tor wraz z wagonem lub wagonami. Wymaga to odpowiednio dużej mocy. Z kolei po rozprężnięciu wagonów lokomotywa porusza się samodzielnie, bez obciążenia w dół toru po kolejne wagony. Podczas realizacji tego rodzaju prac widoczna jest zmiana udziałów czasu pracy względem lokomotywy pracującej w ruchu manewrowym. Zakres wykorzystywanych nastaw, o znaczącym udziale, jest szerszy i dla zakresu od nr 0 do nr 7 stanowi 99,3%. Praca na biegu jałowym w tym wypadku stanowi 32%.

Interesującą informację dotyczącą cykli pracy lokomotyw manewrowych w Kanadzie udostępniła Railway Association of Canada, a dokładnie opisano ją w raporcie dotyczącym projektu Environment & Climate Change Canada – Contract No. 30000704788 [101]. W raporcie przedstawiono średnie zestawienie udziałów czasu pracy lokomotyw manewrowych, tzw. „Yard Switching” (Rys. 4.7). Według danych zawartych w raporcie pojazdy wykonujące pracę tego typu spędzają 80,7% na biegu jałowym. Z kolei pojazd w ruchu przebywa 19,3% czasu, z czego na nastawach nr 1, nr 2 i nr 3 kolejno 7,3%, 6,3% oraz 3,1%. Praca na pozostałych nastawach jest minimalna. Oznacza to, że wykorzystywany do prac zakres mocy jest znacznie mniejszy niż dostępny potencjał.

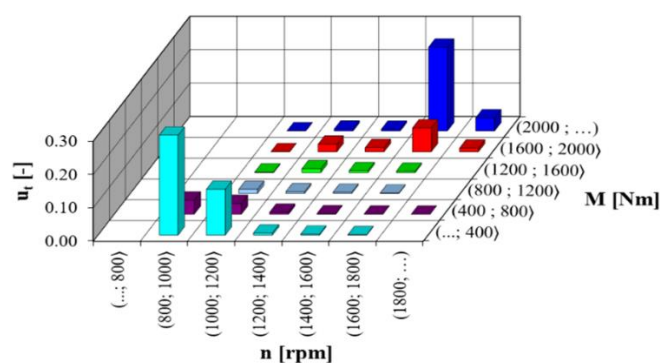


Rys. 4.7. Udziały czasu pracy kanadyjskich lokomotyw manewrowych (na podstawie [101])

### Pojazdy pasażerskie

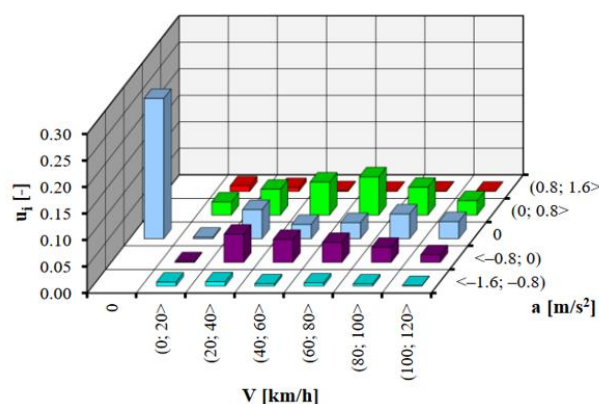
Przewozy pasażerskie mogą być realizowane za pomocą lokomotyw, które ciągną wagony pasażerskie. Jest to klasyczny sposób znany od początku kolejowych przewozów pasażerskich. Innym rozwiązaniem jest wykorzystanie jedno lub wieloczołowych pojazdów pasażerskich takich jak zespoły trakcyjne lub szynobusy. Pojazdy tego typu są chętnie wykorzystywane i aktualnie stanowią znaczną większość pasażerskiej floty trakcyjnej w Polsce [43]. Szynobusy spalinowe oraz SZT w niewielkim stopniu są wyposażone w przekładnię elektryczną. Jedynie najnowsze pojazdy posiadają takie rozwiązanie. W większości pojazdy te są wyposażone w przekładnię hydrauliczną lub mechaniczną. Oznacza to, że charakter pracy silnika spalinowego oraz parametry jezdne pojazdu mogą się różnić od tych w pojazdach z przekładnią elektryczną.

W pracy Szymlet, N. et al. (2024) [102] zbadany pod względem emisji został SZT w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Na trasie kolejowej w Polsce o długości 80 km znajdowało się 19 stacji, na których pojazd się zatrzymywał. Udziały czasu pracy zostały przedstawione dla zakresów pracy silnika moment obrotowy – prędkość obrotowa silnika (Rys. 4.8). Silnik pracował w dwóch głównych obszarach. Pierwszym był obszar niskich obciążeń oraz prędkości obrotowych stanowiących około połowę czasu pracy, gdzie praca na biegu jałowym stanowiła 29,96% czasu. Drugim obszarem były okolice maksymalnego obciążenia i prędkości obrotowych. W tym obszarze największy udział (25,14%) stanowił zakres dla obciążenia większego od 2000 Nm oraz prędkości obrotowej (1600-1800) obr./min. Pozostałe punkty pracy były jedynie przejściowymi pomiędzy biegiem jałowym, a pełnym obciążeniem.



Rys. 4.8. Udziały czasu pracy silnika spalinowego (obciążenie – prędkość obrotowa) pojazdu pasażerskiego SZT podczas realizacji przewozów pasażerskich [102]

Innym sposobem przedstawiania udziałów czasu pracy, szczególnie w przypadku pojazdów samochodowych, jest wykorzystanie parametrów jezdnych pojazdu, tj. prędkość – przyspieszenie. Dla pojazdów szynowych metoda ta jest jeszcze względnie nowa. Na rysunku 4.9 przedstawiono udziały czasu pracy SZT, gdzie wykorzystano parametry przejazdowe pojazdu [96]. Do badań w rzeczywistej eksploatacji na odcinku 57 km wykorzystany został dwuczłonowy SZT o masie 89 ton. Z badań wynika, że największy udział czasu pracy stanowił postój pojazdu (26,6%). Podczas jazdy przy stałej prędkości pojazd spędził 19,4%. Jednakże suma udziałów czasu dla przyspieszeń  $(0; 0,8)$  m/s<sup>2</sup> wyniosła 28,7%, a proces zmniejszania prędkości w zakresie  $(0; -0,8)$  m/s<sup>2</sup> zajął 17,8%. Pojazd pracował również w pozostałych rozpatrywanych obszarach, tj. duże wartości przyspieszenia i procesu zmniejszania prędkości, jednak udziały te są pomijalne. SZT poruszał się w bardzo dynamiczny sposób. Większość czasu, gdy pojazd był w ruchu, stanowiło przyspieszanie lub hamowanie. Wpływ na to miały zapewne postoje na stacjach kolejowych.



Rys. 4.9. Udziały czasu pracy pojazdu pasażerskiego SZT podczas realizacji przewozów pasażerskich (prędkość – przyspieszenie) [96]

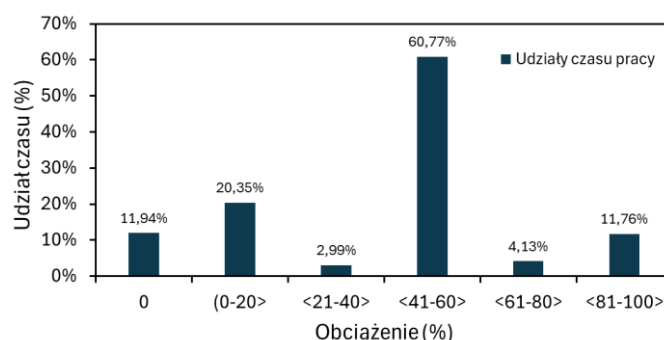
### Pojazdy oraz prace specjalne

Według raportu UTK w 2023 roku w Polsce pojazdy specjalne stanowiły 3,76% wszystkich pojazdów szynowych z ważnym statusem w europejskim systemie rejestracji pojazdów kolejowych (European Vehicle Register – EVR) [17]. Należy jednak zaznaczyć, że wszystkie wagony w Polsce stanowiły 86,3%, a pojazdy trakcyjne takie jak lokomotywy, zespoły trakcyjne i inne stanowiły 9,94%. Po wyłączeniu z rozważań wszystkich wagonów w Polsce, pojazdy specjalne stanowią 27,5% pozostałych pojazdów. Pomimo, że co czwarty pojazd spośród pojazdów trakcyjnych i specjalnych jest pojazdem pomocniczym, istnieje znaczny deficyt publikacyjny dotyczący pojazdów specjalnych. W tym również publikacji dotyczących parametrów eksploatacyjnych takich pojazdów. Tematyka publikacyjna dotyczy przede wszystkim lokomotyw oraz zespołów trakcyjnych.

Jednym z nielicznych artykułów, w którym poruszany jest obszar rzeczywistej eksploatacji pojazdu specjalnego, jest Daszkiewicz, P. et al. (2021) [103]. Obiektem badawczym była profilarka ław

torowiska PŁT500 z silnikiem spalinowym o mocy 200 kW. Profilarka jest przeznaczona do oczyszczania tłuźnia z roślinności i innych zanieczyszczeń. Zebrany i oczyszczony tłuźń jest następnie odkładany w miejsce, z którego został pobrany. Na koniec procesu maszyna profiluje ławę torowiska, w celu zwiększenia parametrów eksploatacyjnych szlaku kolejowego.

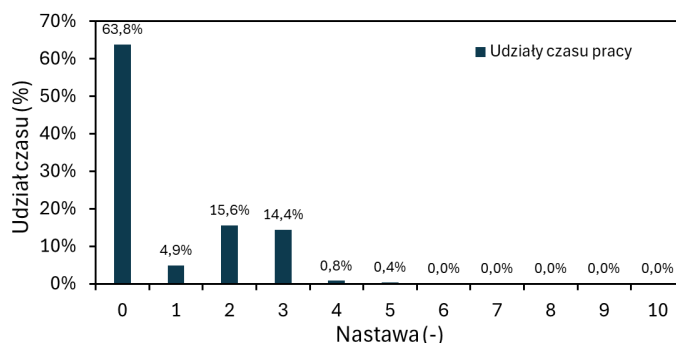
Podczas badania pojazd wykonywał kilka prac różniących się od siebie przede wszystkim obciążeniem. Maszyna najczęściej pracowała z obciążeniem w przedziale (40-60) % przez 60,77% czasu (Rys. 4.10). Drugim najczęstszym zakresem obciążenia był (0-20) %, gdzie silnik spalinowy pracował przez 20,35% czasu. Udziały czasu pracy dla biegu jałowego oraz zakresu maksymalnego obciążenia (80-100) % były bardzo do siebie zbliżone i wynosiły kolejno 11,94% oraz 11,76%. Praca na pozostałych zakresach obciążenia odbywała się sporadycznie. Maszyna torowa pracowała na biegu jałowym z najmniejszym udziałem czasowym spośród wszystkich przytoczonych wcześniej publikacji. Dodatkowo udział zakresu pracy dla średniego obciążenia maszyny torowej był największym udziałem pracy dla obciążeń większych od biegu jałowego, spośród wszystkich danych eksploatacyjnych przytoczonych wcześniej.



Rys. 4.10. Udział obciążenia podczas pracy profilarki ław torowiska PŁT-500 (na podstawie [103])

Ze względu na mocno ograniczoną liczbę publikacji na temat pojazdów pomocniczych w zestawieniu dotyczącym pojazdów oraz prac specjalnych przytoczono przykład wykorzystania lokomotywy manewrowej SM42 pracującej na szlaku [100]. Pojazd brał udział w pracach pomocniczych mających na celu modernizację linii kolejowej nr 354 w Polsce. Lokomotywa transportowała

w pięciu wagonach samowyładowczych nowy tłuźń potrzebny do prac budowlanych. Najwięcej czasu silnik lokomotywy spędził na pracy na biegu jałowym (63,8%) (Rys. 4.11). Spośród 10 nastawników obciążenia, podczas prac wykorzystanych zostało jedynie pięć początkowych, z czego nr 4 i nr 5 w stopniu marginalnym. Podczas pracy na obciążeniu większym niż bieg jałowy najdłużej silnik pracował na nastawie nr 2 (15,6%) oraz nr 3 (14,4%). Rodzaj wykonywanej pracy w tym przypadku zdecydowanie wpłynął na mało dynamiczny charakter realizacji zadań. Lokomotywa przez większość czasu stała, a w momentach, gdy pojazd był w ruchu, przejazd prawdopodobnie odbywał się z bardzo małymi prędkościami.



Rys. 4.11. Histogram obciążeń silnika spalinowego lokomotywy serii SM42 pracującej na szlaku (modernizacja linii - prace budowlane) [100]

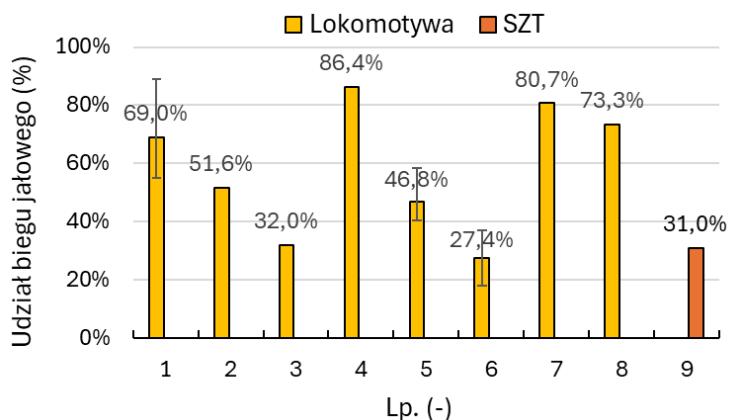
### 4.3. Praca na biegu jałowym

Z analizy przytoczonych powyżej publikacji wynika, że pojazd szynowy nie zawsze pracuje na wszystkich punktach obciążenia, czy to nastawniki, czy zakresy obciążenia silnika. Jednakże, we wszystkich przypadkach opisywane udziały czasu pracy pojazdów szynowych obejmowały pracę na biegu jałowym. Praca ta często jest niezauważana, jednak stanowi istotną rolę podczas eksploatacji. Niezaprzeczną zaletą spalinowych pojazdów szynowych jest ich możliwość poruszania się po każdym rodzaju linii, tj. zelektryfikowanej lub nie. Zastosowanie silników dużych mocy w takich pojazdach niesie za sobą konieczność ich ciągłej pracy. Pojazd podczas zmiany musi być ciągle gotowy do jazdy lub wykonywania prac. Dodatkowo silnik napędza inne urządzenia jak sprężarka lub generator pomocniczy, które uzupełniają poziom powietrza w układzie hamulcowym oraz energię elektryczną systemów pokładowych lub oświetlenia.

W przypadku pojazdów samochodowych stosowane są systemy mające na celu wyłączanie silnika spalinowego podczas postoju. Rozwiązanie to pozwala wyeliminować zużycie paliwa oraz emisję spalin względem okresu pracy na biegu jałowym. Dla pojazdów szynowych wprowadzenie takiego systemu, szczególnie dla wielkogabarytowych silników dużej mocy, często jest nieuzasadnione. Uruchomienie silnika zajmuje dużo czasu. Należy na przykład przed rozruchem silnika uruchomić pompę oleju silnikowego i upewnić się, że czynniki osiągnął właściwy poziom ciśnienia. Po uruchomieniu silnika należy również upewnić się, że pozostałe wskaźniki są na odpowiednim poziomie. W niektórych pojazdach, gdy temperatura cieczy chłodzącej spadnie poniżej pewnego poziomu, należy najpierw nagrzać ten układ, co również pochłania czas. W nowszych pojazdach należy również uruchomić system elektroniczny całego pojazdu, co również wymaga znaczną ilość czasu. Dodatkowo, podczas procesu uruchamiania spalinowego silnika kolejowego, występuje zwiększona emisja związków szkodliwych spalin i zwiększone zużycie paliwa [104] oraz wiąże się z możliwością uszkodzenia elementów pojazdu [105] i powoduje zwiększone zużycie samego silnika [106,107]. Skraca to żywotność silnika i prowadzi do częstszych przeglądów, napraw i wyłączenia ze służby pojazdu. Z powyższych powodów praca na biegu jałowym jest częścią służby pojazdów kolejowych.

#### Praca manewrowa

Udziały czasu pracy na biegu jałowym podczas wykonywania prac manewrowych poniżej zostały zamieszczone na rysunku 4.12 oraz w tabeli 4.1. Dane dotyczą przede wszystkim lokomotyw manewrowych. Jeden przykład dotyczy manewrów wykonywanych przez SZT [108]. W tym wypadku manewry polegały na wyjeździe pojazdu z miejsca stacjonowania do dworca pasażerskiego, na którym to pojazd miał zacząć pasażerską pracę przewozową. Ten rodzaj pracy wymagał udziału czasu pracy na poziomie 31%. Był to drugi najmniejszy udział spośród zestawienia. Najniższy udział w zestawieniu, tj. 27,4%, dotyczył pracy lokomotywy manewrowej na bocznicie kolejowej podczas trzech 12- godzinnych zmian [109]. W tym wypadku rzeczywisty udział biegu jałowego zapewne byłby znacznie wyższy ze względu na metodykę pomiarów. Dane były zapisywane w dwuminutowych zakresach i uśredniane. Dlatego wyniki dotyczą zakresów, gdzie silnik spalinowy pracował na biegu jałowym przez pełne rejestrowane dwuminutowe okna pomiarowe.

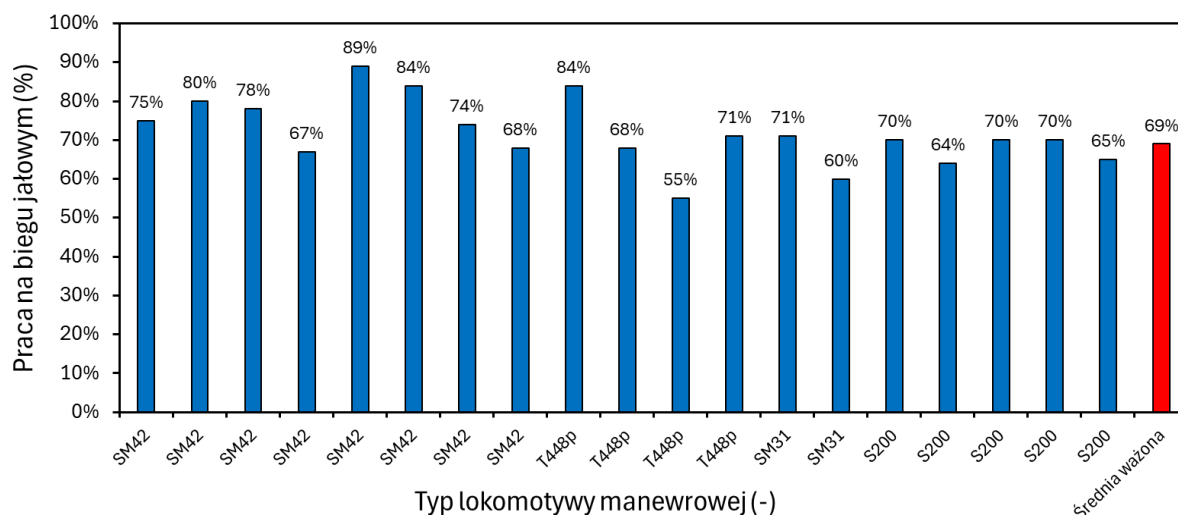


Rys. 4.12. Udziały czasu pracy pojazdów szynowych na biegu jałowym podczas prac manewrowych

Tab. 4.1. Udziały czasu pracy pojazdów szynowych na biegu jałowym podczas prac manewrowych

| Lp | Kraj    | Pojazd | Typ    | Silnik / Moc                      | Rodzaj pracy                     | Liczba pojazdów | Liczba pomiarów | Udział pracy na biegu jałowym (min-max) | Artykuł    |
|----|---------|--------|--------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------------|------------|
| 1  | Polska  | Loko.  | -      | -                                 | manewrowa                        | 19              | 52              | 69,0%<br>(55,0%-89,0%)                  | [109, 110] |
| 2  | Polska  | Loko.  | SM42   | a8C22 / 588 kW                    | manewrowa                        | 1               | 1               | 51,6%                                   | [100]      |
| 3  |         |        |        |                                   | manewrowa i na górze rozrządowej |                 | 1               | 32%                                     |            |
| 4  | Polska  | Loko.  | ST44   | 12 CzN26/26 / 1470 kW             | manewrowa                        | -               | 845 h           | 86,4%                                   | [99]       |
| 5  | Polska  | Loko.  | -      | -                                 | manewrowa                        | 3               | 3               | 46,77%<br>(40,3%-58,3%)                 | [112]      |
| 6  | Ukraina | Loko.  | CHME 3 | 992 kW                            | manewrowa                        | -               | 3x 12h zmiany   | 27,4%<br>(18,1%-36,9%)                  | [109]      |
| 7  | Kanada  | Loko.  | GP38-2 | 16-645E / 1491 kW                 | manewrowa                        | 1               | -               | 80,7%                                   | [101]      |
| 8  |         |        |        |                                   | manewrowa na linii               |                 | -               | 71,4% + jazda wybiegiem 1,9%            |            |
| 9  | Polska  | SZT    | -      | 12,8 dm <sup>3</sup> / 2 x 257 kW | manewrowanie                     | 1               | 1               | 31,0%                                   | [108]      |

W większości przypadków średni czas pracy na biegu jałowym wynosił połowę lub więcej czasu. Największy udział czasu pracy, tj. 86,4%, dotyczył ciężkiej, sześciosiowej lokomotywy ST44 [99], która docelowo jest przeznaczona do realizacji przewozów towarowych na linii kolejowej. Dwa kolejne przykłady, z najwyższym udziałem biegu jałowego, dotyczyły kanadyjskich lokomotyw manewrowych, dla których średnio praca manewrowa na bocznicy zajmowała 80,7%, a na linii kolejowej 73,3%. Dane te pochodzą z kompleksowego raportu kanadyjskiej jednostki kolejowej [101]. Najbardziej dokładne badania dotyczą 19 lokomotyw manewrowych pracujących na bocznicach kolejowych w Polsce (Rys. 4.13) [110,111]. Podczas badań przeprowadzono pomiary dla 52 przejazdów. Najniższy odsetek biegu jałowego dotyczył 55%, a najwyższy 89%. Średnia dla wszystkich pomiarów wyniosła 69% udziału czasu pracy na biegu jałowym.



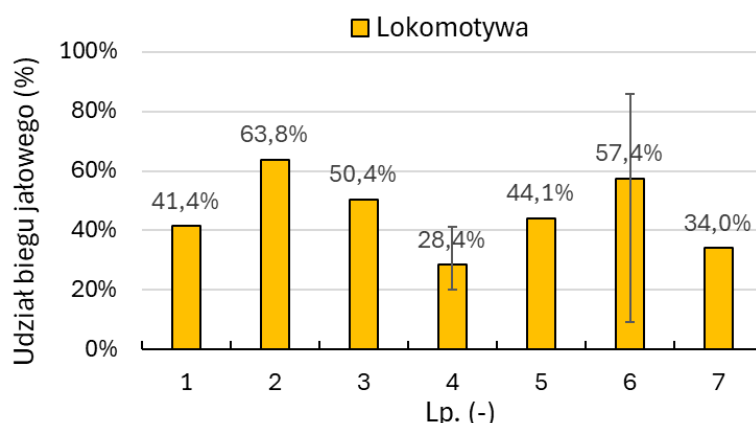
Rys. 4.13. Udziały czasu pracy na biegu jałowym lokomotyw manewrowych w 19 bocznicach w Polsce w zależności od serii pojazdu [110,111]

## Przewozy towarowe

Lokomotywy realizujące przewozy towarowe po linii kolejowej odznaczają się silnikami większych mocy ze względu na konieczność prowadzenia ciężkich składów wagonów towarowych z ładunkiem. Większa moc i objętość skokowa silników może przekładać się na zwiększoną emisję spalin oraz zużycie paliwa, również podczas pracy na biegu jałowym. Pociągi towarowe mają niższy priorytet przewozowy niż pojazdy pasażerskie. Z tego powodu udział czasu pracy na biegu jałowym może być wyższy niż w przypadku pojazdów pasażerskich. Mowa tu o magistralach mieszanych, po których poruszają się zarówno pojazdy pasażerskie jak i towarowe. Istnieją bowiem linie, po których poruszają się jedynie pojazdy towarowe. W tabeli 4.2 oraz na rysunku 4.14 przedstawiono udziały czasu pracy lokomotyw realizujących przewozy towarowe.

Tab. 4.2. Udziały czasu pracy lokomotyw na biegu jałowym podczas przewozów towarowych

| Lp | Kraj       | Pojazd     | Typ    | Silnik / Moc                      | Rodzaj pracy                          | Liczba pojazdów | Liczba pomiarów | Udział pracy na biegu jałowym (min-max) | Artykuł |
|----|------------|------------|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------------|---------|
| 1  | Korea Płd. | Lokomotywa | -      | EMD 16-645E3 / 3000 KM            | towarowy                              | 15              | -               | 41,4%                                   | [97]    |
| 2  | Polska     | Lokomotywa | SM42   | a8C22 / 588 kW                    | praca na linii                        | 1               | 1               | 63,8%                                   | [100]   |
| 3  | Polska     | Lokomotywa | ST44   | 12 CzN26/26 / 1470 kW             | towarowy                              | 1               | 1               | 50,4%                                   | [99]    |
| 4  | Polska     | Lokomotywa | ST44   | -                                 | praca pociągowa w trakcji pojedynczej | 3               | 3               | 28,37% (20%-41,1%)                      | [112]   |
| 5  | Ukraina    | Lokomotywa | CHME 3 | -                                 | operacje eksportowe                   | 1               | -               | 44,1%                                   | [98]    |
| 6  | Ukraina    | Lokomotywa | ČME3   | -                                 | towarowe                              | 1               | 36              | 57,4% (9,3%-85,7%)                      | [109]   |
| 7  | Polska     | Lokomotywa | -      | V12 47,5 dm <sup>3</sup> / 590 kW | ciągnięcie wagonów z kopalni          | 1               | 1               | 34 %                                    | [113]   |



Rys. 4.14. Udziały czasu pracy lokomotyw na biegu jałowym podczas przewozu towarów

W odróżnieniu od prac manewrowych wyniki udziałów czasu pracy na biegu jałowym są bardziej do siebie zbliżone, chociaż zakres wartości zawiera się od 28,4% do 63,8%. Najniższa wartość w zestawieniu dotyczyła pracy pociągowej w trakcji pojedynczej i była realizowana przez ciężką lokomotywę towarową ST44 [112]. Wartość 28,4% jest średnią spośród trzech przejazdów, gdzie najniższy udział biegu jałowego wyniósł 20%, a najwyższy 41,1%. Drugim najniższym udziałem był przejazd lokomotywy towarowej, która ciągnęła wagony z kopalni (34%) [113]. Przejazd mógł

się odbywać na terenie kopalni lub po linii towarowej prowadzącej do kopalni, gdzie natężenie ruchu jest o wiele mniejsze względem standardowych linii kolejowych.

Pozostałe dane z artykułów zawierają się między 41,1% a 63,8%. Należy jednak nadmienić, że dla przykładu numer 6 badania dotyczyły symulacji ruchu lokomotywy w różnych konfiguracjach, dlatego nie jest to wynik rzeczywisty, tylko symulowany [109]. Dla tego przykładu widoczne są duże zakresy pomiarowe, w zależności od warunków symulacji. Najdłuższy udział pracy na biegu jałowym dotyczył prac budowlanych na linii kolejowej [100]. Lokomotywa SM42 prowadziła pociąg towarowy do miejsca prac budowlanych, a następnie wagony samowyładowcze były opróżniane w celu uzupełnienia tłucznia. Jest to zatem przykład częściowej realizacji przewozów towarowych.

### Przewozy pasażerskie

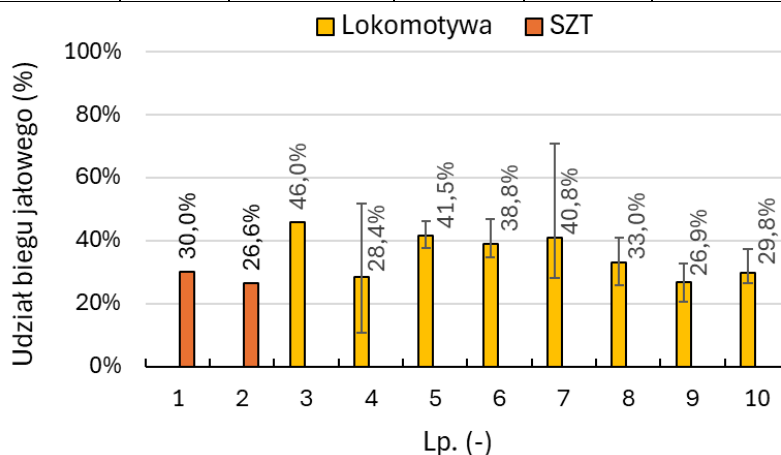
Przewozy pasażerskie, ze względu na najwyższy priorytet przewozowy, poruszają się po liniach kolejowych w dość dynamiczny sposób. Grupą uprzywilejowaną są przede wszystkim pociągi typu ekspres i pociągi pospieszne. Realizacją takich połączeń zajmują się zazwyczaj jednak pojazdy elektryczne. Wyjątek mogą stanowić połączenia przebiegające po liniach niezelektryfikowanych, do których wykorzystywane są lokomotywy i zespoły trakcyjne z napędem spalinowym. Najczęściej jednak pojazdy spalinowe są wykorzystywane do ruchu lokalnego po liniach bez traktacji elektrycznej. W tym przypadku oprócz wymienionych wcześniej rodzajów pojazdów wykorzystuje się również szynobusy spalinowe.

Pomimo, że szynobusy i SZT wykorzystuje się coraz częściej, to jednak w zestawieniu znalazło się najwięcej lokomotyw (Tab. 4.3). Spowodowane jest to bardziej licznymi amerykańskimi publikacjami z tego obszaru [114–117], gdzie na terenie Stanów Zjednoczonych praktycznie nie ma linii zelektryfikowanych, a przejazdy pasażerskie obsługują lokomotywy spalinowe. Cytowane badania cechują się dużą dokładnością pomiarów i oparte są na znacznych i licznych danych pomiarowych. Dla badań amerykańskich średnie udziały czasów pracy na biegu jałowym lokomotyw zawierają się od 26,9% do 41,5%. Jednakże najniższa wartość odnotowana wyniosła 10,6%, a największa to 71%. Przedstawione na rysunku 4.15 wyniki nie obejmują hamowania elektrodynamicznego, którego maksymalna wartość wyniosła 20,3% udziału czasu pracy.

Tab. 4.3. Udziały czasu pracy na biegu jałowym pasażerskich pojazdów szynowych, gdzie DB (Dynamic Break) oznacza hamowanie elektrodynamiczne

| L p | Kraj             | Pojazd     | Typ                    | Silnik / Moc                              | Liczba pojazdów | Liczba pomiarów | Udział pracy na biegu jałowym (min-max)         | Artykuł  |
|-----|------------------|------------|------------------------|-------------------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------------------|----------|
| 1   | Polska           | SZT        | -                      | 2 x 390 kW                                | 1               | 1               | 29,96%                                          | [102]    |
| 2   | Polska           | SZT        | -                      | 2 x 390 kW                                | 1               | 1               | 26,6% (postój)                                  | [96,118] |
| 3   | Republika Czeska | Lokomotywa | Seria 749<br>Seria 754 | ? / 1100 kW<br>K 12 V 230<br>DR / 1460 kW | 2               | 2               | 46%                                             | [119]    |
| 4   | USA              | Lokomotywa | -                      | -                                         | 7               | 48              | 28,4% (10,6%-51,8%)<br>+ DB 11,1% (0,0%-18,6%)  | [115]    |
| 5   |                  | Lokomotywa | F59PH                  | 12N-710G3 / 2240 kW                       | 1               | 5 (15h)         | 41,46% (37,8%-46,1%)<br>+ DB 13,0% (4,8%-19,6%) | [114]    |
| 6   |                  | Lokomotywa | F59PH                  | 12N-710G3 / 2240 kW                       | 1               | 6 (16h)         | 38,82% (34,8%-47,2%)<br>+ DB 10% (5,3%-12,6%)   |          |
| 7   |                  | Lokomotywa | F59PH                  | EMD 12-710G3 / 2240 kW                    | 3               | 11 dni          | 40,8% (28,0%-71,0%)                             | [116]    |
| 8   |                  | Lokomotywa | F59PHI                 | EMD 12-710G3 / 2240 kW                    | 1               | 2 dni           | 33,0% (25,8%-40,9%)<br>+ DB 5,9% (4,9%-6,9%)    |          |

|    |            |              |                        |   |           |                                             |       |
|----|------------|--------------|------------------------|---|-----------|---------------------------------------------|-------|
| 9  | Lokomotywa | GP40         | EMD 16-645E3 / 2240 kW | 1 | 7 dni     | 26,9% (20,7%-32,6%) +DB 15,5% (10,5%-20,3%) |       |
| 10 | Lokomotywa | F59PHI F59PH | EMD 12-710 / 2240 kW   | 6 | ogółem 68 | 29,8% (26,4%-37,3%)                         | [117] |



Rys. 4.15. Udziały czasu pracy pasażerskich pojazdów szynowych na biegu jałowym bez uwzględnienia hamowania elektrodynamicznego

Ostatnia w zestawieniu lokomotywa pracowała w Czechach realizując lokalny ruch pasażerski, gdzie pojazd z dużą częstotliwością zatrzymywał się na stacjach pasażerskich [119]. Z tego powodu udział pracy na biegu jałowym był największy z przytoczonych publikacji i wynosił 46%. W obu przypadkach dotyczących SZT ich eksploatacja odbywała się na terenie Polski i dotyczyła przewozów regionalnych [96,102,118]. Wykonując przewozy pasażerskie o lokalnym charakterze, podobnie jak w przypadku czeskiej lokomotywy, pojazd zatrzymywał się na stacjach co kilka minut jazdy. Z tego powodu udziały pracy na biegu jałowym wyniosły kolejno 30% i 26,6%. Oba badania były przeprowadzone na pojazdach o takich samych mocach silników, lecz na innych trasach przejazdowych.

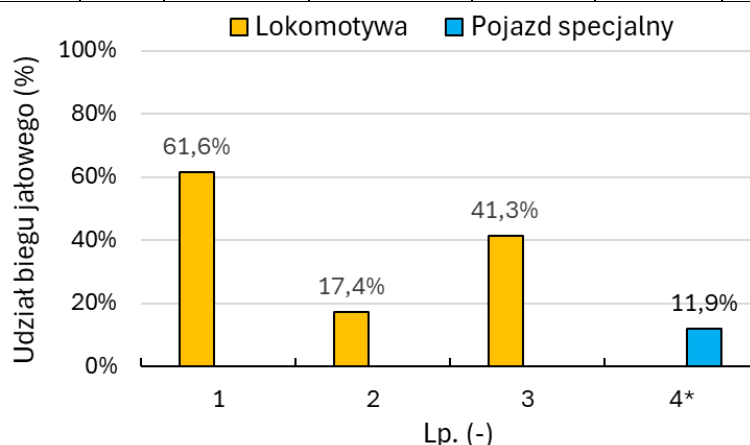
### Operacje niestandardowe

Z powodu małej liczby publikacji dotyczących prac pojazdów specjalnych poniżej zostały przedstawione przykłady operacji niestandardowych (Tab. 4.4, Rys. 4.16). Jednym z takich przykładów było wykorzystanie lokomotywy ST44 do pracy przesyłowej [99]. Praca ta polega na przejeździe pojazdu bez dodatkowego obciążenia, w przypadku lokomotyw bez wagonów, po linii kolejowej na przykład do miejsca pracy, po wagony lub do punktu utrzymania w celu przeprowadzenia naprawy lub przeglądu. Dla tego przypadku praca na biegu jałowym zajęła 61,6% czasu. Pojedyncza lokomotywa, niewykonująca pracy pociągowej, prawdopodobnie musiała spędzić znaczną część czasu na postoju na linii kolejowej w celu przepuszczenia innych pociągów.

Tab. 4.4. Udziały czasu pracy różnych pojazdów szynowych na biegu jałowym podczas wykonywania niestandardowych operacji

| Lp | Kraj       | Pojazd     | Typ               | Silnik / Moc                         | Rodzaj pracy           | Liczba pojazdów | Liczba pomiarów | Udział pracy na biegu jałowym (min-max) | Artykuł |
|----|------------|------------|-------------------|--------------------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------------|---------|
| 1  | Polska     | Lokomotywa | ST44              | 12 CzN26/26 / 1470 kW                | praca przesyłowa       | 1               | 1               | 61,60%                                  | [99]    |
| 2  | Polska     | Lokomotywa | T448 p            | 12V396 / 680 kW                      | przejazd po bocznicach | 1               | 1               | 17,40%                                  | [120]   |
| 3  | Korea Płd. | Lokomotywa | Seria 7300 i 7400 | 2-suw, 16 zaworów 16-645E3 / 3000 KM | testy stacyjne         | 7               | 7               | 41,30%                                  | [121]   |

|    |        |                  |         |                            |                                                    |   |   |                                         |       |
|----|--------|------------------|---------|----------------------------|----------------------------------------------------|---|---|-----------------------------------------|-------|
| 4* | Polska | Pojazd specjalny | PŁT-500 | Wola Henschel H12 / 200 kW | oczyszczanie tłucznia i profilowanie ław torowiska | 1 | 1 | 11,94% (20,35% dla bardzo lekkich prac) | [103] |
|----|--------|------------------|---------|----------------------------|----------------------------------------------------|---|---|-----------------------------------------|-------|



Rys. 4.16. Udziały czasu pracy na biegu jałowym podczas niestandardowych prac

Lokomotywa T448p również wykonywała pracę przesyłową, tym razem po bocznicy kolejowej, gdzie prawdopodobnie kierowała się do wykonywania pracy manewrowej [120]. Dla tego typu pracy, gdy lokomotywa nie poruszała się po linii PKP udział czasu na biegu jałowym wyniósł 17,4%. Na podstawie badań w Korei Południowej na linii Gyeongbu (Seul–Busan) udział czasu pracy na biegu jałowym wyniósł 41,3% [121]. Wartość ta pochodzi z mapy przejazdowej, którą posługują się maszyniści. W przypadku pojazdu specjalnego PŁT500 [103], wykonującego prace utrzymaniowe toru polegające na oczyszczaniu tłucznia i profilowaniu ław torowiska, udział pracy na biegu jałowym wyniósł 11,94%.

#### 4.4. Podsumowanie rozdziału

Dokładne określenie uniwersalnych udziałów czasu pracy, nawet dla pojazdów dedykowanych do konkretnego zadania, jest bardzo złożone. Zależy to bowiem od wielu indywidualnych czynników jak: aktualnie wykonywana praca, organizacja pracy, wykorzystywany pojazd, infrastruktura, ukształtowanie terenu i inne. Z tego powodu wiele wyników badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji, nie tylko dla pojazdów szynowych, ale dla ogółu pojazdów grupy NRMM, może się znacząco różnić od procedur badawczych silników w procesie homologacji. Uniwersalny, dynamiczny test NRTC, dla wszystkich silników z grupy NRMM, z całą pewnością nie będzie w stanie z dużą dokładnością odwzorować rzeczywistej pracy każdego silnika [102,122]. Jednakże nawet testy stacjonarne NRSC, pomimo dedykowanych wersji dla konkretnego zastosowania, np. w zależności od rodzaju pojazdu i mocy, w dalszym ciągu w bardzo wielu przypadkach nie są w stanie odwzorować rzeczywistej eksploatacji z dużą dokładnością [123].

Procedury badawcze Stage, dotyczące emisji spalin, odbywają się na hamowniach silnikowych. Tymczasem aktualna procedura badawcza dla samochodów pasażerskich (PC) zawiera test RDE, w którym pojazd musi poruszać się z określoną prędkością, przyspieszeniem i w danym czasie. Pozwala to zmierzyć emisję spalin pochodzącą z silnika, który napędza pojazd. Homologacja pod względem emisji dla PC odbywa się dla całego pojazdu. Z kolei homologacja dla grupy NRMM odbywa się dla silnika spalinowego, a nie pojazdu lub układu, w którym został zamontowany. Silniki dla maszyn grupy NRMM są dopuszczane, tj. homologowane, jeszcze zanim silnik trafi na docelową maszynę.

Dla silników grupy NRMM być może o wiele bardziej dokładnym sposobem weryfikacji zgodności wartości dopuszczalnych norm względem rzeczywistej emisji, byłoby przeprowadzenie testów podczas rzeczywistej eksploatacji. Zdecydowaną zaletą byłoby działanie silnika w połączeniu ze wszystkimi systemami maszyny, mającymi wpływ na warunki pracy silnika spalinowego. Dodatkowo byłaby to rzeczywista emisja spalin podczas wykonywania określonych działań lub prac. Z drugiej strony, o ile można wyobrazić sobie badanie np. kosiarki spalinowej w rzeczywistych warunkach, o tyle badania silników okrętowych lub tych do ogromnych maszyn budowlanych byłyby

trudne do realizacji podczas realnej eksploatacji. Powodem byłyby ciężkie warunki pracy, w których na co dzień maszyny pracują. Dodatkowo, aparatura PEMS, przy tak dużych rozmiarach, natężeniach przepływu spalin czy też lokalnych dużych stężeniach spalin, musiałaby być odpowiednio dobrze przygotowana do takich badań oraz być odporna na warunki otoczenia. Wszystko to zdecydowanie wydłużyłoby proces i zwiększyło koszty homologacji.

Należy również mieć na uwadze dostępność infrastruktury, na której mogłyby być prowadzone badania. W przypadku lokomotyw lub zespołów trakcyjnych potrzebny do badań byłby tor badawczy lub odcinek linii PKP wraz z dopuszczeniem do realizacji badań, na którym mogłaby się odbywać homologacja. Wydaje się to być kosztownym i skomplikowanym rozwiązaniem, lecz możliwym w realizacji. Przy dopuszczaniu nowych pojazdów szynowych do ruchu, wymagana jest seria badań, w tym podczas rzeczywistych przejazdów. Z tego powodu badania pomiarów emisji, w celu homologacji, mogłyby być przeprowadzane jako obowiązkowa część procesu dopuszczenia pojazdu.

Inną możliwością mogłyby być badania przeprowadzone np. na oporniku wodnym. Silnik pracowałby wtedy, chociaż częściowo, w kooperacji z innymi urządzeniami i układami jak np. prądnica. Jednakże w dalszym ciągu potrzebny byłby test z konkretnymi punktami pracy silnika, jak ma to miejsce na hamowni silnikowej. Opracowanie indywidualnego, dedykowanego planu badań dla pojazdu szynowego, z uwzględnieniem warunków jezdnych i obciążeń, mogłoby być możliwe dzięki wykorzystaniu charakterystyki trakcyjnej pojazdu oraz charakterystyki ogólnej silnika spalinowego. W tym wypadku podstawowym krokiem byłoby wyznaczenie parametrów przejazdowych pojazdu, tj. prędkość pojazdu, przyspieszenia, obciążenia np. masa ciągnionych wagonów lub pochylenie toru. Na tej podstawie możliwe byłoby obliczenie i wyznaczenie punktów pracy silnika zamontowanego na pojeździe, który mógłby być zbadany np. na oporniku wodnym.

Należy pamiętać, że aktualnie badania odbywają się dla konkretnego silnika lub rodziny silników, z kolei przy montażu tej samej jednostki napędowej w pojazdach różnych serii, każdy pojazd musiałby być zbadany indywidualnie. Zdarza się, że w zależności od wersji pojazdu tej samej serii, pojazdy mogą posiadać inne silniki spalinowe. Więc w tym wypadku pojazd tej samej serii musiałby przechodzić homologację jeszcze raz. Dodatkowym czynnikiem, przemawiającym na niekorzyść homologacji całego pojazdu szynowego, są koszty samego pojazdu. Dla pojazdów PC seria produkcyjna jest zazwyczaj bardzo duża, a koszt produkcji jest względnie niski. Z tego powodu koszt badanej jednostki jest stosunkowo niewielki. Tymczasem koszt pojazdu szynowego jest nieporównywalnie większy, a serie produkcyjne często dotyczą kilku lub kilkunastu sztuk. Homologacja silników, a nie całych pojazdów, pod względem emisji, pozwala na znaczące ograniczenie prawdopodobieństwa niespełnienia wymogów norm na ostatnim etapie długiego i kosztownego procesu projektowania i konstruowania maszyn. Tym bardziej, że dobór odpowiedniego silnika spalinowego jest podstawowym krokiem podczas projektowania spalinowego pojazdu szynowego [53].

Badania certyfikujące silniki spalinowe grupy NRMM, wykonywane na hamowniach silnikowych, są na ten moment uzasadnione, przede wszystkim ze względów finansowych. Problem według autora jest upatrywany w małej dokładności procedur badawczych, które mają na celu odwzorować udziały czasu pracy podczas rzeczywistej eksploatacji silnika. Aktualnie rzeczywista emisja spalin lub punkty pracy silnika są bardzo często rozbieżne z tymi zbadanymi na hamowni. Rozwiązaniem problemu mogłyby być bardziej dokładne procedury tj. testy badawcze, które by odwzorowywały rzeczywiste punkty pracy i udziały czasów pracy. W tym celu konieczne stałoby się spersonalizowanie testów badawczych pod dany pojazd, tj. np. konstrukcję oraz przeznaczenie. Możliwe byłoby to jedynie na podstawie zebranych danych statystycznych dotyczących eksploatacji podobnych pojazdów, głównie parametrów przejazdowych. Następnie musiałoby dojść do procesu odwrotnego, gdzie na podstawie charakterystyki trakcyjnej pojazdu wyznaczone zostałyby punkty pracy na charakterystyce ogólnej badanego silnika. Test zindywidualizowany do konkretnego silnika i jego przeznaczenia o wiele dokładniej odwzorowywałby przyszłą, rzeczywistą eksploatację silnika i pojazdu.

Aktualnie badania emisji pojazdów szynowych w rzeczywistej eksploatacji mogłyby służyć jedynie jako nieobligatoryjny element podczas dopuszczania pojazdów, który weryfikowałby zgodność poziomu emisji z normą oraz warunkami eksploatacji. Po spełnieniu wymagań normatywnych pojazd mógłby otrzymać certyfikat zgodności. Generowałoby to jednak dodatkowe koszty i mało, który producent lub właściciel pojazdu byłby zainteresowany tego rodzaju badaniem. W przypadku mniejszych, trakcyjnych pojazdów szynowych, takich jak wybrane pojazdy specjalne, zasadność badań

pomiarów emisji w rzeczywistych warunkach eksploatacji, na wzór PC, wydaje się większa. Szczególnie mowa tu o pojazdach z mniej skomplikowanym układem napędowym, np. z przekładnią mechaniczną lub hydrauliczną, gdzie pojazd pracuje w sposób bardziej zbliżony do klasycznego. Jednakże, pomimo o wiele bardziej dokładnych pomiarów podczas rzeczywistej eksploatacji, badania tego typu powszechnie mogłyby wejść w życie jedynie przy odpowiednim umocowaniu prawnym. Na tę chwilę głównym celem powinny być działania w celu opracowania i wprowadzenia bardziej dokładnych i zindywidualizowanych pod dany pojazd i jego przeznaczenie procedur badawczych.

Wykonywanie badań pomiaru emisji spalin w rzeczywistych warunkach mogłoby być uzasadnione w przypadku, gdy pojazd został zmodernizowany, zmodyfikowany lub doszło do napraw na poziomie P4 lub P5. Dotyczyłoby to szczególnie jednostek starszych, których odsetek w Polsce jest bardzo duży. Wykonanie badań tego typu pozwoliłoby na weryfikację zasadności wprowadzanych zmian lub też napraw głównych jednostek napędowych. W wielu przypadkach przeprowadzenie naprawy głównej silnika pozwala na jego ponowne zamontowanie na pojeździe, a silnik w dalszym ciągu obowiązuje normy z okresu, w którym został wyprodukowany. Oznacza to, że jednostka napędowa w dalszym ciągu może być eksploatowana, pomimo obowiązywania nowszych, bardziej restrykcyjnych norm emisji.

## 5. Cel i zakres pracy

Projektowanie i konstruowanie układów napędowych przez wiele lat miało na celu poprawę parametrów użytkowych pojazdów i maszyn. Jedną ze składowych było zwiększanie sprawności ogólnej silników spalinowych. Aktualnie, rozwój silników jest również silnie ukierunkowany na redukcję emisji związków szkodliwych w spalinach w celu dopuszczenia pojazdu lub jednostki napędowej na rynek. W spalinowych pojazdach kolejowych podstawowym rodzajem napędu są silniki o ZS. Pojazdy te ze względu na charakter pracy potrzebują wyższych wartości momentu obrotowego, często w zakresie mniejszych prędkości obrotowych silnika spalinowego. Z tego powodu silniki o ZS są szeroko wykorzystywane nie tylko na kolei, ale również w pozostałych maszynach z grupy NRMM. Dodatkową zaletą jest mniejsze zużycie paliwa względem silników o ZI. Cechą charakterystyczną dla silników ZS jest również zwiększona emisja cząstek stałych oraz tlenków azotu. W kontekście wprowadzanych uaktualnień oraz nowych przepisów ograniczających dopuszczalne wartości emisji związków toksycznych znajdujących się w spalinach stwarza to wyzwanie dla producentów nowo wprowadzanych jednostek napędowych na rynek. Silniki spalinowe muszą być wyposażane w coraz bardziej skuteczne układy redukujące emisję związków szkodliwych.

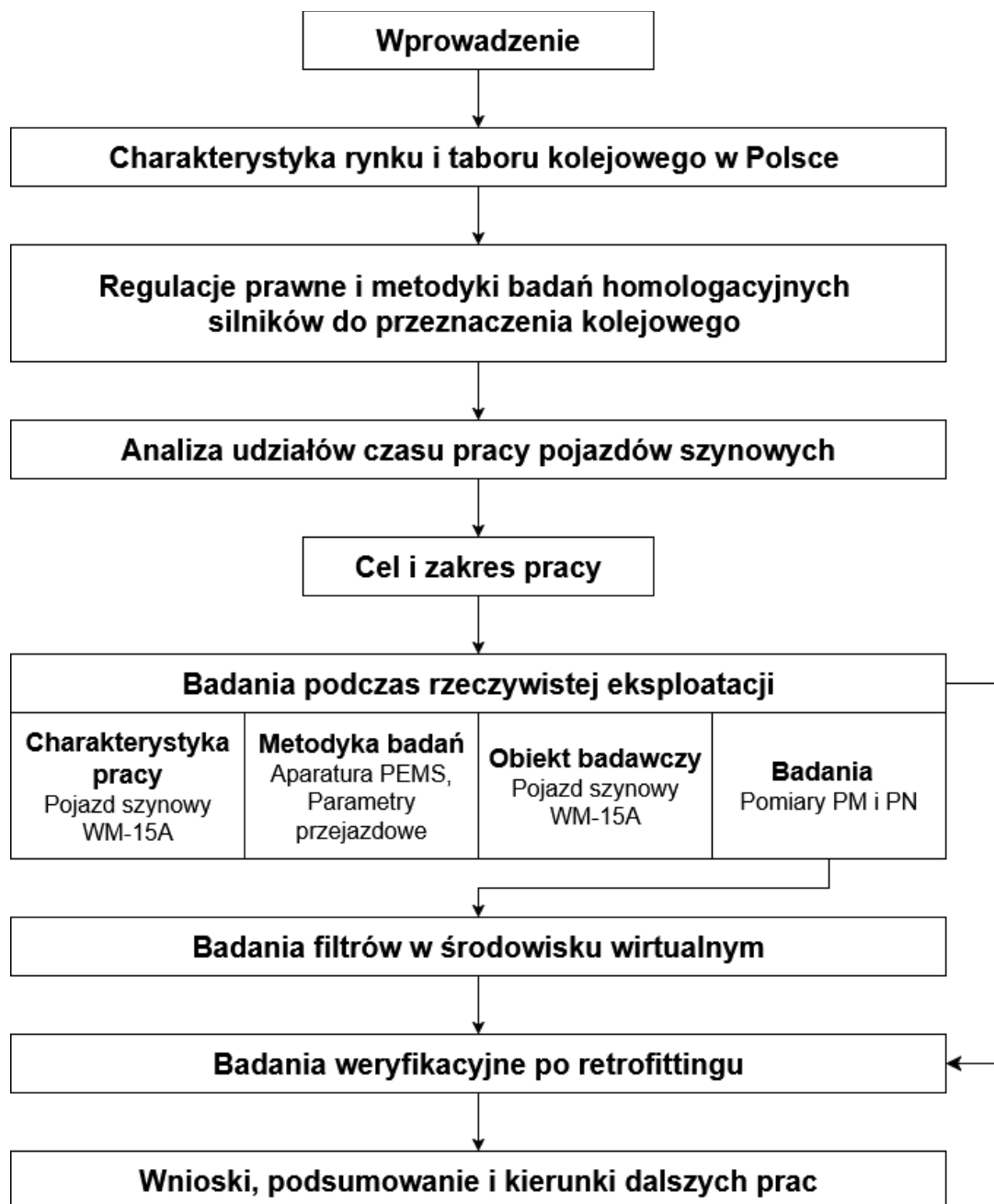
Przepisy te dotyczą jednak nowych silników stosowanych w maszynach i pojazdach. Biorąc pod uwagę średnią wieku, łożystość, a także powolny proces wymiany silników oraz pojazdów na nowe, przewiduje się, że przez najbliższe lata w większości wciąż będą eksploatowane głównie pojazdy z silnikami spalinowymi starszej generacji. Jednostki te, ze względu na okres wprowadzenia na rynek, wciąż obowiązują przestarzałe i liberalne normy emisji spalin. Z tego powodu, w pracy podjęto działania naukowe mające na celu redukcję cząstek stałych emitowanych przez współcześnie użytkowane układy napędowe pojazdów kolejowych starszej generacji poprzez zastosowanie retrofitingu. W celu doboru odpowiedniego układu, w pracy wykorzystane zostaną analizy numeryczne. W dysertacji przedstawiono proces analizy udziałów czasu pracy pojazdu eksploatowanego w rzeczywistych warunkach eksploatacji, badania pomiarów emisji spalin z pojazdu docelowego, badania symulacyjne obliczeniowej mechaniki płynów układów oczyszczania spalin do redukcji cząstek stałych oraz weryfikację i analizę efektów prac. Istotą przeprowadzonych badań i analiz było poznanie, poszerzenie i odkrycie nowej wiedzy, charakteryzującej i opisującej podjęte w dysertacji problemy z obszaru eksploatacji wybranych środków transportu.

Mając na uwadze powyższe, **celem poznawczym pracy jest szczegółowa analiza i ocena skutecznych metod i systemów oczyszczania spalin stosowanych w pojazdach szynowych. Celem użytecznym dysertacji jest opracowanie i wdrożenie metody doboru układu oczyszczania spalin, filtrów DPF do retrofitingu pojazdów szynowych oraz naukowa weryfikacja skuteczności działania tych systemów w rzeczywistych warunkach eksploatacji.**

Realizacja sformułowanych celów pracy (poznawczego i użytecznego) była możliwa poprzez wykonanie 7 szczegółowych zadań badawczych (Rys. 5.1):

1. Określenie i scharakteryzowanie łożystości oraz wieku taboru kolejowego w Polsce.
2. Scharakteryzowanie regulacji prawnych dotyczących procesu utrzymania pojazdów szynowych oraz dopuszczalnych poziomów emisji związków szkodliwych spalin dla nowych, dopuszczanych na rynek, kolejowych silników spalinowych.
3. Określenie charakteru i udziałów czasu pracy w zależności od rodzaju pojazdu szynowego.
4. Badania dotyczące rzeczywistych udziałów czasu i charakteru pracy kolejowego pojazdu specjalnego podczas pełnej zmiany roboczej.
5. Badania dotyczące pomiarów emisji spalin pojazdu szynowego przeznaczonego do retrofitingu.
6. Stworzenie modeli filtrów DPF w środowisku wirtualnym i przeprowadzenie symulacji numerycznych obliczeniowej mechaniki płynów (Computational Fluid Dynamics – CFD) opartych na rzeczywistych warunkach eksploatacji w celu wyboru najkorzystniejszego rozwiązania.
7. Ocena i analiza efektywności pracy wybranego rozwiązania na pojeździe po procesie retrofitingu podczas badań terenowych.

Dla osiągnięcia celu użytecznego pracy sformułowano problem badawczy w postaci pytania: **Jakie czynniki, modele, wskaźniki i parametry pracy analizowanych silników spalinowych są niezbędne dla przeprowadzenia skutecznego postępowania pozwalającego na dobór filtra DPF do retrofitingu pojazdu szynowego oraz weryfikację skuteczności jego działania w rzeczywistych warunkach eksploatacji.** Dla rozwiązania sformułowanego problemu badawczego niezbędnym było odpowiednie zastosowanie naukowych metod poznawczych w tym opracowanie adekwatnych modeli numerycznych ich oceny i weryfikacji.



Rys. 5.1. Schemat realizacji pracy doktorskiej

## 6. Metodyka badań

### 6.1. Aparatura pomiarowa

Pomiary emisji spalin z pojazdów są częścią procedur homologacyjnych na całym świecie. W przypadku pojazdów typu Heavy Duty Vehicles (HDV) lub pojazdów pozadrogowych typu NRMM badania odbywają się w warunkach stacjonarnych. Z kolei według najnowszych wymagań norm emisji spalin dla pojazdów samochodowych np. sektora Passenger Cars (PC) lub Light Duty Vehicles (LDV) pomiary emisji spalin odbywają się w warunkach rzeczywistej eksploatacji tzw. Real Driving Emission (RDE). W obu przypadkach do tego celu potrzebna jest odpowiednia aparatura pomiarowa o znacznym stopniu dokładności pomiarowej.

Dokładnym, a jednocześnie kompaktowym rozwiązaniem jest wykorzystanie do tego celu aparatury typu PEMS. Jest to mobilna aparatura pomiarowa, którą można wykorzystać zarówno do badań emisji spalin w warunkach stacjonarnych, jak i po zamontowaniu na pojeździe, w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Aparatura typu PEMS mierzy głównie stężenie, liczbę lub rozkład wymiarowy związków, które znajdują się w spalinach. Z tego powodu, w celu uzyskania emisji np. masy w danej jednostce czasu konieczne jest również posiadanie wiedzy na temat rzeczywistego natężenia przepływu spalin.

Informacje na ten temat można uzyskać między innymi poprzez wykorzystanie przepływomierza spalin zamontowanego na układzie wylotowym. Przepływomierz może jednak posiadać znaczne wymiary, co w wielu przypadkach jest problematyczne między innymi ze względu na montaż urządzenia na pojeździe. W przypadku pojazdów kolejowych jest to szczególnie utrudnione, ze względu na obowiązujące przepisy kolejowe, a dokładniej konieczność zachowania (nieprzekroczenia) zarysu skrajni kolejowej. Z wymienionych powodów, innym sposobem uzyskania informacji na temat natężenia przepływu spalin jest obliczenie tego parametru na podstawie ciśnienia w kolektorze dolotowym, temperatury powietrza przed komorą spalania, prędkości obrotowej wału korbowego oraz masy zużytego paliwa. Dodatkowo, konieczne jest rejestrowanie warunków otoczenia za pomocą mobilnych stacji meteorologicznych.

Ze względu na realizację projektu wybrano oraz wykorzystano najkorzystniejszą do tego celu aparaturę pomiarową, będącą na wyposażeniu laboratorium Politechniki Poznańskiej. Wybrana aparatura typu PEMS cechuje się znaczną uniwersalnością i kompaktowością, co umożliwiło i ułatwiło realizację zaplanowanych badań. Podczas wykonywania pomiarów za pomocą PEMS pojazdy były wyposażone w GPS, który umożliwiał pomiar prędkości pojazdu, wysokości, szerokości i długości geograficznej. Poniżej przedstawione zostały informacje na temat poszczególnych urządzeń wykorzystanych do badań.

#### AVL Micro Soot Sensor

Część cząstek pochodzących z silników o spalaniu ZS, zazwyczaj od 20 do 80%, składa się z węgla elementarnego. Jest on również określany jako sadza lub dym. Jego masę można określić przez ekstrakcję lub termodesorpcję. Jeśli zamiast filtrów z włókna szklanego powlekanego teflonem stosuje się filtry z włókna szklanego, można to również osiągnąć za pomocą termoanalitycznej metody „kulometrycznej”.

Aparatura do pomiaru sadzy w spalinach AVL Micro Soot Sensor (Rys. 6.1) opiera się na fotoakustycznej metodzie pomiaru (Rys. 6.2a) [124]. W tej metodzie pomiaru próbka gazu z „czarnymi”, tj. silnie absorbującymi cząstkami sadzy, jest wystawiana na działanie modulowanego światła. Okresowe ocieplanie i chłodzenie oraz wynikające z tego rozszerzanie i kurczenie się gazu nośnego można traktować jako falę dźwiękową i wykrywać za pomocą mikrofonów. Czujnik sadzy AVL Micro Soot zawiera wbudowany laser półprzewodnikowy klasy 4, który emituje niewidzialne promieniowanie o długości fali  $808 \pm 5$  nm. Ze względu na konstrukcję i środki bezpieczeństwa sprzętu elektrycznego urządzenie jest klasyfikowane jako produkt laserowy klasy 1.

Czyste powietrze nie wytwarza sygnału. Gdy badany przepływ gazów zawiera sadzę lub spaliny, sygnał wzrasta proporcjonalnie do stężenia sadzy w objętości pomiarowej. Jest to znacząca zaleta w porównaniu z metodami opacymetrycznymi, które wykorzystują zmniejszenie „sygnału zerowego” od 100% natężenia światła, nieprzezroczystości, jako wartości pomiarowej. W ten sposób można uzyskać znaczny wzrost czułości.

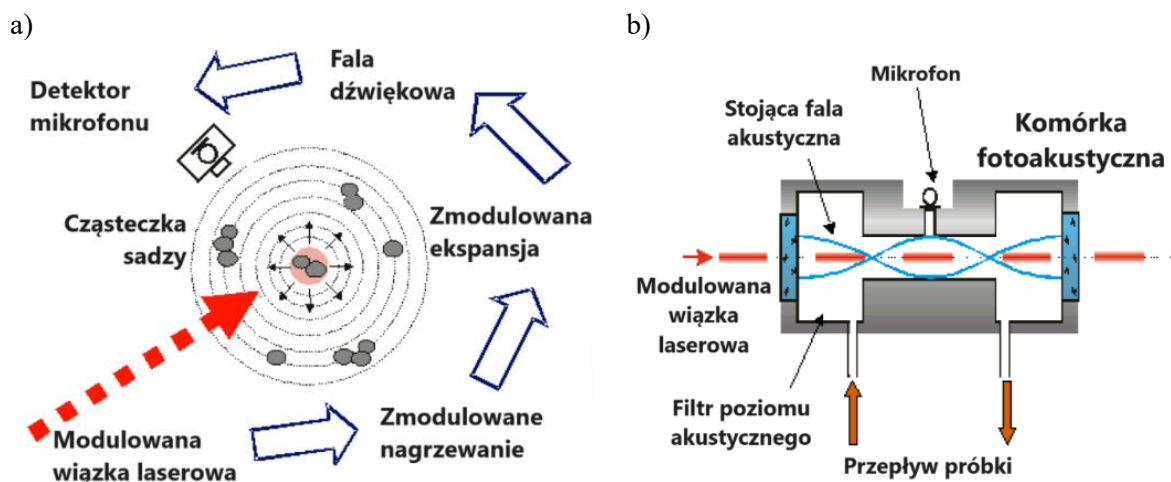
W celu uzyskania odpowiedniej czułości, konieczna jest specjalna konstrukcja komórki pomiarowej. Stosowana jest komórka rezonansowa w wersji tzw. „open pipe”. Charakteryzuje się ona następująco:

- średnica jest mała w porównaniu do długości  $L$ ,
- średnica jest rozszerzona na obu końcach komórki („filtr poziomu akustycznego”).

W ten sposób powstaje stojąca fala akustyczna, z węzłami fali ciśnieniowej na końcach komórki i maksymalną amplitudą fali ciśnieniowej w środku. Zwiększenie średnicy zmniejsza amplitudę fali akustycznej w „filtrze poziomu akustycznego” (Rys. 6.2b).



Rys. 6.1. Urządzenie pomiarowe typu PEMS – AVL Micro Soot Sensor [124]



Rys. 6.2. Fotoakustyczna metoda pomiaru w AVL Micro Soot Sensor:

a) zasada działania pomiaru fotoakustycznego, b) schemat budowy ogniwa rezonansowego [124]

Z tych zasad wynikają następujące zależności:

- Częstotliwość rezonansowa komórki (a zatem i powiązana długość fali  $\lambda$ ) jest określana przez długość  $L_R$  rezonatora.
- Ze względu na maksimum ciśnienia występuje w centralnej części komórki, mikrofon musi być umieszczony w środku komórki.
- Amplituda odpowiadającej fali prędkości akustycznej, która jest przesunięta o  $90^\circ$  w stosunku do fali ciśnienia, staje się zerowa na ustalonych końcach „filtra poziomu akustycznego”, tj. okienkach. Odpowiada to przeciwwęzłowi ciśnienia. Wraz z pierwszym elementem zapewnia, że całkowita długość komórki  $L$  musi być parzystą wielokrotnością  $n \lambda/2$ .  $L = n \times \frac{\lambda}{2}$ .
- Wlot i wylot gazu muszą być umieszczone w węzłach fali ciśnienia, aby nie zakłócić fali ciśnienia przez nieunikniony szum przepływu na krawędziach wlotowych.

W tabeli 6.1 przedstawione zostały najważniejsze dane techniczne dotyczące urządzenia pomiarowego AVL Micro Soot Sensor.

Tab. 6.1. Dane techniczne urządzenia pomiarowego AVL Micro Soot Sensor [124]

| Parametr                                         | Wartość                                   | Uwagi                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pomiar koncentracji sadzy („elementarny węgiel”) | < 50 mg/m <sup>3</sup>                    | -                                                                                                                                                                                |
| Rozdzielczość wyświetlacza (cyfrowa)             | 0,001 mg/m <sup>3</sup>                   | -                                                                                                                                                                                |
| Szybkość transmisji danych cyfrowych             | max. 5 Hz                                 | -                                                                                                                                                                                |
| Szybkość transmisji danych analogowych           | 100 Hz                                    | -                                                                                                                                                                                |
| Zakłócenia pomiarowe                             | ≤ 0,01 mg/m <sup>3</sup>                  | (zdefiniowane jako 3-krotność odchylenia standard. zmienności pomiaru sygnału zerowego [czyste, filtrowane powietrze] z wygładzaniem danych 1s)                                  |
| Rozdzielczość wartości pomiaru                   | ≤ 0,01 mg/m <sup>3</sup>                  |                                                                                                                                                                                  |
| „Dryfowanie”                                     | ≤ 0,01 mg/m <sup>3</sup> na godzinę       | (zdefiniowane jako zmiana średniej wartości sygnału zerowego [czyste, filtrowane powietrze] w ciągu 1 h)                                                                         |
| Powtarzalność i odtwarzalność                    | ≤ 3%                                      | (określone jako odchylenie od wartości odniesienia grawimetrycznego identycznego składu cząstek przy użyciu identycznej sondy próbkującej, po pomyślnym sprawdzeniu rozpiętości) |
| Stopień rozrzedzenia spalin (SRS)                | 2-20                                      | -                                                                                                                                                                                |
| Dokładność SRS (Błąd)                            | 2+(0,5×SRS) %                             | -                                                                                                                                                                                |
| Wlot powietrza                                   | 1 ± 0.2 bar (wzg.)<br>Przepływ: > 4 l/min | -                                                                                                                                                                                |

**Axion R/S+**

Do pomiarów wykorzystano aparaturę PEMS model AXION R/S+™ firmy GLOBAL MRV (Rys. 6.3). Urządzenie mierzy stężenie CO<sub>2</sub>, CO, C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>, O<sub>2</sub>, NO i masę cząstek stałych (PM). Zawartość CO<sub>2</sub>, CO i HC (heksanu) mierzy się za pomocą metody Non-Dispersive Infrared (NDIR), a O<sub>2</sub> i NO za pomocą ogniw elektrochemicznych (ang. electrochemical cells). PM szacowane jest za pomocą metody rozpraszania lasera (ang. laser scattering) [125]. Poprzednie badania wskazują, że metoda ta powoduje tendencję do zawyżania emisji PM. Zatem, chociaż niepewność nie jest brana pod uwagę, każdy uzyskany wynik będzie zawierał rzeczywistą wartość PM, powiększoną o margines błędu. Jeżeli ostatecznym celem jest zastosowanie tej metody do celów homologacji typu, przeszacowanie zapewnia, że wartości rzeczywiste nie przekroczą wartości zmierzonych. Do rejestracji danych z urządzenia wykorzystano system akwizycji danych z częstotliwością próbkowania 1 Hz. Próbki spalin pobierane są bezpośrednio z układu wydechowego silnika i były transportowane do urządzenia PEMS za pomocą drogi grzanej. W tabeli 6.2 przedstawiono zakres i dokładność aparatury AXION R/S+™.

Tab. 6.2. Zakres pomiarowy i specyfikacje dokładności urządzenia AXION R/S+™ firmy GLOBAL MRV [126]

| Badany składnik | Zakres                                            | Dokładność                  | Rezolucja              | Pomiar i T90            |
|-----------------|---------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|
| HC (Heksan)     | 0 – 2 000 ppm                                     | ±4 ppm abs.<br>lub ±3% rel. | 1 ppm                  | NDIR<br>< 3,5           |
| CO              | 0,00 – 10,00 %                                    | ±0,02% abs.<br>lub ±3% rel. | 0,001 vol. %           | NDIR<br>< 3,5           |
| CO <sub>2</sub> | 0,00 – 16,00 %                                    | ±0,3% abs.<br>lub ±3% rel.  | 0,01 vol. %            | NDIR<br>< 3,5           |
| NO              | 0 – 5 000 ppm                                     | ±5 ppm abs.<br>lub ±1% rel. | 1 ppm                  | Electrochemical<br>< 5s |
| O <sub>2</sub>  | 0,00 – 25,00 %                                    | ±0,02% abs.<br>lub ±1% rel. | 0,01 vol. %            | Electrochemical<br>< 6s |
| PM              | 0,00 mg/m <sup>3</sup><br>do 250 g/m <sup>3</sup> | ±2% rel.                    | 0,01 mg/m <sup>3</sup> | Laser Scattering 2s     |



Rys. 6.3. Urządzenie typu PEMS: AXION R/S+™ firmy GLOBAL MRV [102]

### TSI EEPS 3090

Spektrometr Engine Exhaust Particle Sizer (EEPS) 3090 firmy TSI (Rys. 6.4a) jest urządzeniem pomiarowym o wysokiej rozdzielczości, który mierzy stężenie oraz rozkład wymiarowy cząstek stałych znajdujących się np. w spalinach [127]. Próbkowanie odbywa się z częstotliwością 10 Hz, co czyni go dobrze przystosowanym do badań pomiarów emisji spalin w warunkach dynamicznych, jak np. badania RDE. Urządzenie mierzy rozkład wielkości i stężenie cząstek stałych w spalinach silnikowych w zakresie od 5,6 do 560 nanometrów (Tab. 6.3). EEPS wykorzystuje szereg czułych elektrometrów, połączonych z trzema zastrzeżonymi macierzami inwersji danych, aby dostarczać dane o wielkości cząstek w czasie rzeczywistym w 32 kanałach wielkości (16 kanałów na dekadę). Macierze inwersji danych pozwalają zoptymalizować dokładność rozkładu wielkości dla określonych typów cząstek.

Tab. 6.3. Dane techniczne urządzenia pomiarowego TSI EEPS 3090 [127]

| Parametr                          | Wartość                              |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Liczba kanałów pomiarowych        | 16 kanałów na dekadę (całkowicie 32) |
| Rozmiar mierzonych cząstek        | 5,6 ÷ 560 nm                         |
| Liczba kanałów elektrometrycznych | 22 aktywne, ogólnie 24               |
| Rozdzielczość                     | 10/sekundę                           |
| Przepływ próbki spalin            | 10 dm <sup>3</sup> /min              |
| Przypływ sprężonego powietrza     | 40 dm <sup>3</sup> /min              |
| Temperatura próbki wejściowej     | 10–52°C                              |
| Temperatura pracy urządzenia      | 0–40°C                               |
| Masa całego urządzenia            | 32 kg                                |
| Częstotliwość                     | 10 Hz                                |
| Stopień rozcieńczenia             | od 10:1 do 500:1                     |
| Rozdzielczość czasowa             | 10 rozkładów wielkości/s             |

Przyrząd pobiera próbkę spalin z układu wylotowego w sposób ciągły (Rys. 6.4b). Cząstki są najpierw wystawiane na działanie ujemnie naładowanego jonizatora koronowego, a następnie dodatnio naładowanego jonizatora koronowego, aby doprowadzić nawet wysoko naładowane aerozole do przewidywalnego poziomu naładowania elektrycznego. Następnie naładowane cząstki są wprowadzane do obszaru pomiarowego w pobliżu środka kolumny elektrody wysokiego napięcia i transportowane w dół kolumny otoczonej powietrzem osłonowym filtrowanym przez filtr HEPA (High Efficiency Particulate Air Filter).

Do elektrody przykładane jest dodatnie napięcie co tworzy pole elektryczne, które odpycha dodatnio naładowane cząstki na zewnątrz zgodnie z ich ruchliwością elektryczną. Naładowane cząstki uderzają w odpowiednie elektrometry i przenoszą swój ładunek. Cząstka o wyższej ruchliwości elektrycznej uderza w elektrometr w pobliżu góry, podczas gdy cząstka o niższej ruchliwości elektrycznej uderza w elektrometr niżej w stosie. Ten układ wielu detektorów wykorzystujący wysoce czułe elektrometry

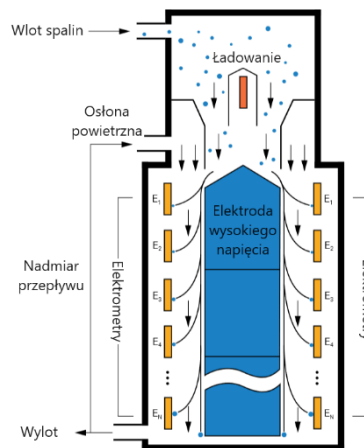
umożliwia jednocześnie pomiary stężeń wielu rozmiarów cząstek. Dzięki wbudowanemu, wydajnemu procesorowi DSP model 3090 wykorzystuje zaawansowaną inwersję danych w czasie rzeczywistym do dekonwolucji danych. Standardową metodą określania wielkości cząstek submikrometrowych jest użycie spektrometru TSI Scanning Mobility Particle Sizer.

Urządzenie EEPS jest przeznaczone do takich czynności jak: scharakteryzowanie cząstek stałych znajdujących się w spalinach, analiza działania układów oczyszczania spalin, analiza emisji cząstek stałych z układów hamulcowych, badania nad aerosolami.

a)



b)

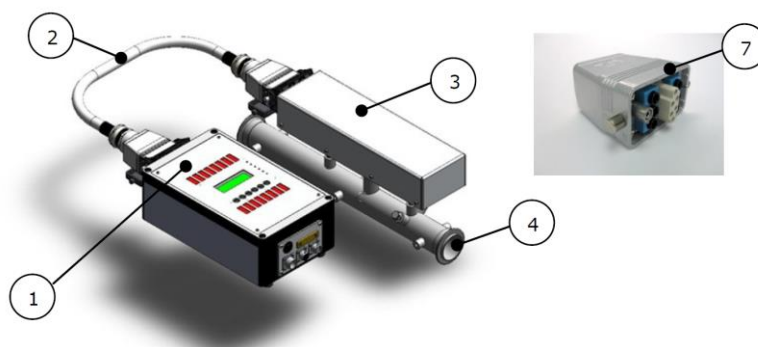


Rys. 6.4. Urządzenie pomiarowe TSI EEPS 3090:

a) widok z zewnątrz, b) schemat przepływu spalin urządzeniu [127]

### Przepływomierz SEMTECH EFM-HS

SEMTECH EFM-HS firmy Sensors to wytrzymały, kompaktowy przepływomierz, zaprojektowany specjalnie do pomiaru surowych spalin z silników z zapłonem samoczynnym i iskrowym. Dzięki współczynnikowi redukcji powyżej 50:1 EFM-HS zapewnia doskonałą dokładność i liniowość w szerokim zakresie przepływów i temperatur. Może być używany jako samodzielne urządzenie do pomiaru przepływu lub w połączeniu z analizatorem gazu, takim jak SEMTECH-DS, do określania emisji masowych w czasie rzeczywistym. EFM-HS spełnia lub przewyższa wszystkie amerykańskie i europejskie normy emisji dla przepływomierzy spalin [128].



Rys. 6.5. Standardowe komponenty przepływomierza: SEMTECH EFM-HS firmy Sensors:

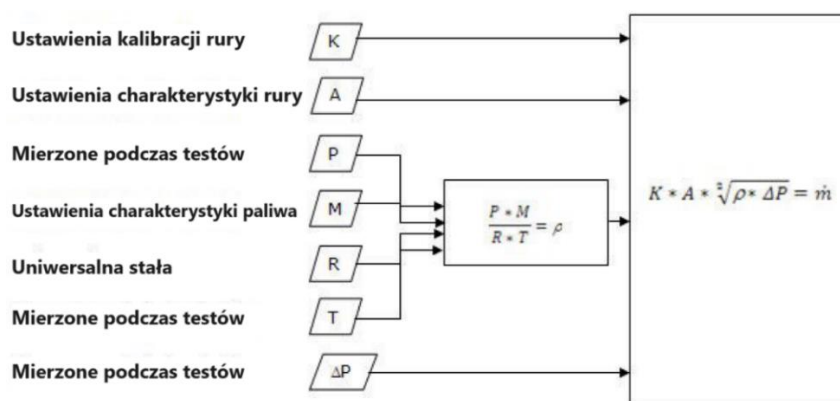
1 - Moduł elektroniczny, 2 - Wiązka przewodów pneumatycznych, 3 - Elektronika rurowa, 4 - Rura przepływowa, 5 - Kable szeregowo (podłączane do komputera– nie pokazano), 6 - Przewód zasilający (nie pokazano), 7 - Wtyczka do elektroniki rurowej (musi być podłączona do elektroniki rurowej, jeśli nie jest używana wiązka przewodów pneumatycznych) [128]

Urządzenie Semtech EFM-HS składa się z kilku elementów (Rys. 6.5). Są to przede wszystkim: moduł elektroniczny, przewody pneumatyczne, elektronika znajdująca się w rurach, kable, przewód zasilający, wtyczka do elektroniki rurowej. Dodatkowo, w celu wykonania pomiarów niezbędne jest posiadanie komputera z odpowiednimi wymaganiami systemowymi oraz aplikacja stworzona

przez producenta przepływomierza. Dane techniczne dotyczące opisywanego przepływomierza zostały przedstawione w tabeli 6.4. Urządzenie standardowo posiada zakres pomiarowy dla temperatury spalin od -5 °C do 700 °C. W przypadku maksymalnych wartości natężenia masy przepływu spalin, to są one zależne od wielkości użytych rur/kanałów przepływowych. Najmniejszy kanał posiada średnicę wylotową 25 mm i długość 762 mm. Największa rura/kanał ma 152 mm średnicy wylotowej oraz długość 1524 mm. Największa wartość natężenia przepływu masy spalin jaka może być zmierzona, to 2940 m<sup>3</sup>/min przy 200 °C.

Tab. 6.4. Dane techniczne dotyczące przepływomierza Semtech EFM HS [128]

| Parametr                                | Wartość                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Zakres temperatury spalin               | - 5 – 700 °C standardowa opcja (dostępna możliwość większych zakresów temperatur)                                                                                     |
| Dokładność pomiaru temperatury spalin   | ± 1% wartości rejestracji lub ± 2°C, jeśli wartość jest większa                                                                                                       |
| Dokładność pomiaru przepływu spalin     | Przewyższa normy 1065 podrozdział D i ISO 16183. Dokładność pomiaru przepływu: ± 2% odczytu lub ± 0,5% pełnej skali, w zależności od tego, która wartość jest większa |
| Liniiowość pomiaru przepływu            | < 1.0% pełnej skali                                                                                                                                                   |
| Czas nagrzewania urządzenia             | < 5 min. przy 20°C otoczenia                                                                                                                                          |
| Czas odpowiedzi systemu                 | < 2 ms                                                                                                                                                                |
| Szybkość transmisji danych              | 5 Hz standardowa opcja                                                                                                                                                |
| Opcja dużej prędkości transmisji danych | 500 Hz (100 Hz opcja wyświetlania)                                                                                                                                    |
| Rezolucja                               | 0,1 SCFM                                                                                                                                                              |
| Wymagania mocy                          | 12 VDC, 30 W, 110 VAC                                                                                                                                                 |
| Rozmiary modułu sterującego             | 36cm x 18cm x 10cm (LxDxW)                                                                                                                                            |
| Waga modułu sterującego                 | 4 kg                                                                                                                                                                  |
| Max. do zmierzenia przepływ przy 200 °C | 2940 (m <sup>3</sup> /min)                                                                                                                                            |



Rys. 6.6. Dane wejściowe, równania i wyniki obliczeń wykonanych przez SEMTECH EFM-HS [128]

Finalna wartość pochodząca z przepływomierza, tj. natężenie przepływu masy spalin, jest obliczana na podstawie kilku parametrów zmierzonych lub zadanych podczas badań. Na rysunku 6.6 przedstawiono informacje dotyczące danych, równań i wyników obliczeń, które biorą udział w procesie obliczenia masy przepływu spalin. Ostateczny wzór (6.1) przedstawiono poniżej:

$$\dot{m} = K \cdot A \cdot \sqrt{\sigma \cdot \Delta P} \quad (6.1)$$

gdzie:

- $\dot{m}$  – natężenie przepływu masy spalin,
- $K$  – współczynnik wypływu dla rur przepływowych jako funkcja liczby Reynoldsa,
- $A$  – fizyczny przekrój poprzeczny rury przepływowych,
- $\sigma$  – gęstość spalin,
- $\Delta P$  – gradient ciśnienia.

Wartości dla  $K$  oraz  $A$  wynikają z ustawień oraz geometrycznych rozmiarów aparatury. Gradient ciśnień ( $\Delta P$ ) pochodzi z pomiarów wykonanych za pomocą rurki Pitot'a znajdującej się w rurze pomiarowej. Gęstość spalin pochodzi z obliczeń bazujących na prawie Bernoulli'ego i przedstawia je wzór (6.2):

$$\sigma = \frac{P \cdot M}{R \cdot T} \quad (6.2)$$

gdzie:

- $P$  – ciśnienie bezwzględne gazu,
- $M$  – masa molowa gazu,
- $R$  – uniwersalna stała gazowa,
- $T$  – temperatura bezwzględna gazu.

## 6.2. Pojazd, infrastruktura oraz przygotowanie do badań

### Pojazd

Wózek motorowy WM-15A jest samojezdnym pojazdem szynowym przeznaczonym do przewożenia różnorodnych materiałów używanych przez służby utrzymania infrastruktury, a głównie: podsypki, akcesoriów kolejowych, szyn o długości do 6 m, lekkich maszyn, sprzętu, urządzeń. Pojazdy te są wykorzystywane również do ciągnięcia wagonów, jak na przykład wagony z kruszywem, potrzebnym przy pracach naprawczych lub utrzymaniowych linii kolejowych. W kabinie wózka, oprócz miejsca dla operatora, przewidziano 5 miejsc siedzących dla przewożonych pracowników. Do sprawnego załadunku oraz rozładunku przewożonych materiałów lub sprzętu, wózek posiada żuraw hydrauliczny i wychylną na obie strony toru skrzynię ładunkową. Wózek został zaprojektowany

do jazdy ze specjalnie opracowaną przyczepą typu PWM-15. Jednocześnie, może poruszać się w składzie z innymi wagonami. Napęd jazdy na dwie osie zapewnia dostateczną siłę uciągu wózka. W razie potrzeb wózek może być wykorzystywany do przetaczania wagonów o masie powyżej 50 000 kg.

Do załadunku materiałów sypkich wózek może być wyposażony w chwytak do ładowacza hydraulicznego typu „Cyklop” L214, zaś do przyspieszenia załadunku podkładów kolejowych w chwytak do podkładów o symbolu WMA-123.0.00 produkcji ZNTK Stargard. W wózku zastosowano hamulec klockowy działający na obydwie zestawy kołowe, sterowany z kabiny oraz zespolony, stosowany podczas hamowania w składzie pociągu. Zgodnie z wymaganiami UIC zamontowane są typowe

sprzęgi śrubowe oraz zderzaki, co pozwala na łączenie wózka z innymi jednostkami taboru kolejowego w składzie pociągu na końcu. Wózek motorowy może być w ten sposób transportowany do miejsca pracy.



Rys. 6.7. Pojazd WM-15A [129]

Pojazd WM-15A, będący obiektem badawczym (Rys. 6.7), został wyprodukowany w 1985 roku. Nadano mu numer boczny 161 (Tab. 6.5). Przez wiele lat pracy służył jako pojazd pomocniczy w przedsiębiorstwach zajmujących się utrzymaniem infrastruktury kolejowej. Stan techniczny pojazdu był utrzymywany na dobrym poziomie, przechodząc kolejne przeglądy i naprawy techniczne.

Podczas jednej z napraw, przeprowadzonej kilka lat temu, silnik pojazdu przeszedł remont generalny. Dzięki odpowiedniemu utrzymaniu, pojazd był dopuszczony do poruszania się po liniach kolejowych PKP. Świadczy o tym nadany numer EVN, który aktualnie nie jest aktywny. Oznacza to, że pojazd jest dopuszczony do poruszania się wyłącznie po zamkniętej infrastrukturze kolejowej, bez możliwości wyjazdu na linię kolejową. Pojazd do dziś posiada w przeważającej większości oryginalne części i układy, w tym silnik spalinowy. Obiekt badawczy został zakupiony przez Sieć Badawczą Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny pod koniec 2023 roku. Po liniach kolejowych PKP wciąż porusza się wiele pojazdów specjalnych, w tym WM-15A, zbliżonych stanem technicznym i latami produkcji do obiektu badawczego.

Tab. 6.5. Dane techniczne dotyczące pojazdu WM-15A

| Parametr                                                 | Wartość                                                                                              |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rodzaj pojazdu                                           | Wózek Motorowy                                                                                       |
| Typ                                                      | WM-15A                                                                                               |
| Numer fabryczny                                          | 161                                                                                                  |
| Rok produkcji                                            | 1985                                                                                                 |
| Producent                                                | Przedsiębiorstwo Państwowe Zakłady Naprawcze Taboru Kolejowego „Stargard” w Stargardzie Szczecińskim |
| Prędkość transportowa                                    | max 80 km/h                                                                                          |
| Prędkość robocza                                         | do 20 km/h                                                                                           |
| Powierzchnia ładunkowa                                   | 16,5 m <sup>2</sup>                                                                                  |
| Masa własna                                              | 20 t                                                                                                 |
| Szerokość toru                                           | 1 435 mm                                                                                             |
| Nośność                                                  | 15 t                                                                                                 |
| Długość ze zderzakami                                    | 12 450 mm                                                                                            |
| Odległość powierzchni skrzyni ładunkowej od główki szyny | 1 300 mm                                                                                             |
| Udźwig żurawia hydraulicznego                            | 1500 kg                                                                                              |
| Zasięg żurawia                                           | 4 000 mm                                                                                             |
| Ilość miejsc siedzących                                  | 1+5                                                                                                  |
| Rozstaw kół jezdnych                                     | 5 850 mm                                                                                             |
| Średnica kół jezdnych                                    | 900 mm                                                                                               |
| Masa na oś w stanie załadowanym                          | 17 t                                                                                                 |
| Przełożenie                                              | Mechaniczne, 5 biegów                                                                                |

Tab. 6.6. Dane dotyczące silnika spalinowego badanego pojazdu

| Parametr                             | Wartość                                                                                             |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Silnik                               | Prawd. wersja SW680/17 z turbodoładowaniem                                                          |
| Typ silnika                          | 4-suwowy z ZS                                                                                       |
| Układ / liczba cylindrów             | Rzędowy / 6                                                                                         |
| Średnica cylindra                    | 127 mm                                                                                              |
| Suw tłoka                            | 146 mm                                                                                              |
| Objętość skokowa                     | 11,1 dm <sup>3</sup>                                                                                |
| Zakres mocy dla tej rodziny silników | 90,5-191 kW (123-260 KM)                                                                            |
| Moc silnika @ prędkość obrotowa      | 176 kW (240 KM) @ 2200 obr./min.                                                                    |
| Zakres prędkości obrotowej           | 1400-2200 obr./min.                                                                                 |
| Stopień sprężania                    | 15,8:1                                                                                              |
| Kierunek obrotów                     | Przeciwnie do ruchu wskazówek zegara<br>(patrząc od strony koła zamachowego)                        |
| Rozruch                              | Elektryczny                                                                                         |
| Odbiór mocy                          | Z koła zamachowego przez suche sprzęgło cierne, sprzęgło elastyczne lub przekładnia hydrokinetyczna |

Silniki SW680 były produkowane przez Zakład Produkcji Silnikowej, będący częścią Wytwórni Sprzętu Komunikacyjnego „PZL-Mielec”. Produkcja odbywała się na podstawie licencji brytyjskiej firmy Leyland. Rodzina silników SW680 była mocno zróżnicowana pod względem mocy i w zależności od docelowego zastosowania i wynosiła od 90,5 kW (123 KM) do 191 kW (260 KM). W pojazdach typu WM-15A podstawowym silnikiem, w który były wyposażone, był wolnossący SW680/123 o mocy 147 kW. Jednakże w obiekcie badawczym zastosowana została mocniejsza wersja silnika z turbosprężarką tj. SW680/17 o mocy 176 kW (240 KM). W tabeli 6.6 zostały zamieszczone dane dotyczące silnika SW680.

### Wagon pomiarowy typu 150C

Wagon pomiarowy typu 150C został wykorzystany w celu obciążenia pojazdu WM-15A podczas wykonywania badań pomiaru emisji spalin (Rys. 6.8). Wagon został zbudowany w wyniku modernizacji konstrukcyjnej wagonu osobowego bezprzedziałowego kl. 2 typu Z1 wg UIC 567-2 na prędkość 200 km/h (oznaczenie fabryczne 150A przed modernizacją). Modernizacja dotyczyła głównie nowego rozplanowania pomieszczeń i ich wyposażenia, przy czym większość urządzeń podwagonowych jak układy klimatyzacji, zasilania i hamulca oraz wózki pozostały bez zmian. Wagon pomiarowy 150C przeznaczony jest do prowadzenia badań taboru kolejowego z prędkością do 200 km/h na normalnotorowych liniach krajowych i zagranicznych.



Rys. 6.8. Pojazd WM-15A sprzęgnięty z wagonem pomiarowym typu 150C

Tab. 6.7. Dane dotyczące wagonu pomiarowego typu 150C

| Parametr                                                                                                                                                                                                                                     | Wartość                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Szerokość toru                                                                                                                                                                                                                               | 1435 mm                                                                                              |
| Długość wagonu ze zderzakami                                                                                                                                                                                                                 | 26400 mm                                                                                             |
| Długość pudła                                                                                                                                                                                                                                | 26100 mm                                                                                             |
| Wysokość wagonu od główki szyny                                                                                                                                                                                                              | 4050 mm                                                                                              |
| Szerokość wagonu                                                                                                                                                                                                                             | 2825 mm                                                                                              |
| Średnica toczna kół nowych/zużytych                                                                                                                                                                                                          | 920/860 mm                                                                                           |
| Masa własna wagonu w stanie służbowym                                                                                                                                                                                                        | 50 t                                                                                                 |
| Promień minimalnego łuku toru dla wagonu obciążonego i w stanie sprzęgniętym                                                                                                                                                                 | 150 m                                                                                                |
| Promień minimalnego łuku toru dla pojedynczego wagonu próżnego niesprzęgniętego                                                                                                                                                              | 80 m                                                                                                 |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Maksymalna prędkość eksploatacyjna wagonu</li> <li>Po zmianie ułożyskowania wagon może być przystosowany do większej prędkości przy odpowiednim rozstawieniu znaków na szlakach kolejowych</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>55,55 m/s (200 km/h)</li> <li>83,33 m/s (300 km/h)</li> </ul> |
| Hamulec                                                                                                                                                                                                                                      | Tarczowy i szynowy                                                                                   |
| Wózki                                                                                                                                                                                                                                        | 11ANa (7020 kg)<br>11ANa/1 (7030 kg)                                                                 |

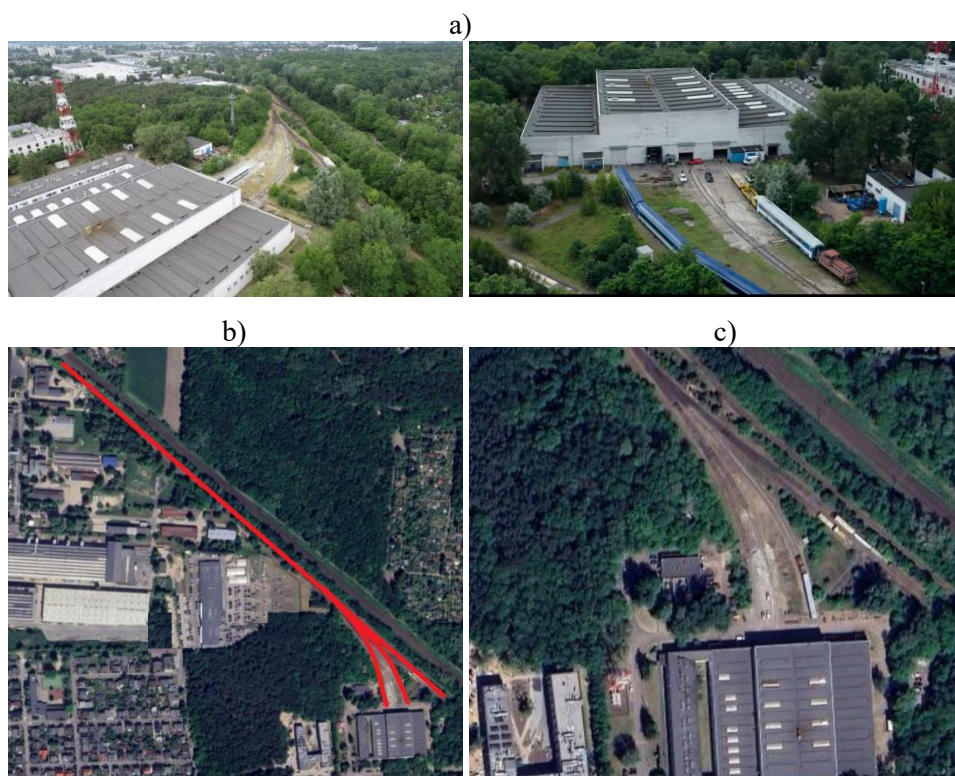
Po zmianie ułożyskowania wózków wagon może osiągać prędkość do 300 km/h na torach o odpowiednim rozstawieniu znaków i urządzeń sygnalizacyjnych. Ważniejsze badania pojazdów szynowych, jakie można realizować przy pomocy wagonu pomiarowego 150C to:

- badania wytrzymałościowe w ruchu,
- badania skuteczności hamowania,
- badania właściwości akustycznych pojazdów,
- badania spokojności biegu,
- badania właściwości trakcyjnych.

Najważniejsze dane techniczne dotyczące wagonu zostały przedstawione w tabeli 6.7.

### Infrastruktura kolejowa i trasy badawcze

Normalnotorowa bocznica kolejowa Ł-PIT (Rys. 6.9) jest bocznicą stacyjną, położoną przy stacji Poznań Wschód, odgałęzia się od toru stacyjnego nr 4, rozjazdem nr 19, w km 299,071 linii kolejowej nr 3 Warszawa Zachodnia – Kunowice, na stacji Poznań Wschód. Punktem styku bocznicy z obszarem zarządcy infrastruktury – „PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Zakład Linii Kolejowych w Poznaniu” jest w km 298,017 linii kolejowej nr 3 Warszawa Zachodnia – Kunowice. Punkt ten stanowi zakończenie toru dojazdowego nr 301 do bocznicy (własność PKP PLK S.A.) oraz początek bocznicy (tor nr 1701 własność Ł-PIT).



Rys. 6.9. Hala oraz bocznica kolejowa przy Ł-PIT na ul. Warszawskiej 181 w Poznaniu:  
a) widok na halę, b) zaznaczone tory na bocznicy, c) widok na bocznice w pobliżu hali

Bocznica kolejowa Ł-PIT zasadniczo przeznaczona jest do:

- wykonywania manewrów związanych z zabieraniem i podstawianiem taboru na tory zdawczo - odbiorcze oraz punkty, przy których dokonywane są prace badawcze taboru,
- wykonywania prób nabiegu (odrzut z jednym wagonem),
- wykonywania pomiarów sił - Y, Q, H, w quasistatycznych warunkach ruchu,
- dokonywania pomiarów sił występujących między kołem i szyną podczas przejazdu przez łuk o promieniu R150 co umożliwia określenie stosunku sił Y/Q ( $Y/Q < 1,2$ ) oraz stwierdzenie czy w sprawdzanym pojeździe nie występuje nadmierne wspinanie koła prowadzącego na główkę szyny tzn. nie została przekroczona wartość  $\lim (dz)_a = 5 \text{ mm}$ ,

- badania pchania po łuku S dla nowo budowanych wagonów, dla których przenoszona siła ściskająca wzdłużna, nie może być określona na podstawie wymiarów geometrycznych. Badanie przeprowadza się na torze nr 1812, który posiada dwa łuki o promieniu R150, które są połączone odcinkiem prostym o długości 6,5 m.

Do podstawowych zadań pracy manewrowej na bocznicy Łukasiewicz - PIT należy:

- zabieranie pojazdów kolejowych z torów ogólnodostępnych zarządcy infrastruktury i podstawienie ich na punkt zdawczo – odbiorczy,
- zabieranie pojazdów kolejowych z punktu zdawczo - odbiorczego i podstawianie ich na tory ogólnodostępne,
- prowadzenie prac o charakterze badawczym.

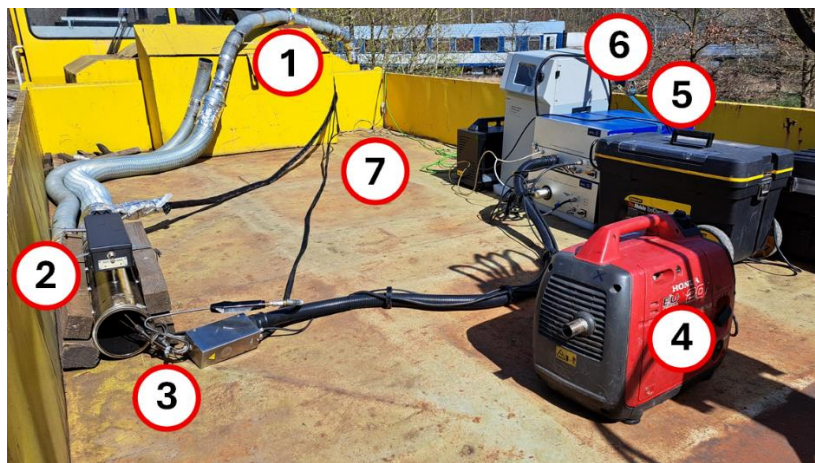
Ze względu na przeznaczenie, bocznic kolejowa Ł-PIT odznacza się znacznym zróżnicowaniem charakterystyki torów. Bocznic została zaprojektowana z myślą o możliwościach badawczych taboru szynowego. Z tego powodu tory oraz profile nasypów posiadają unikatowe cechy, takie jak znaczne pochylenia podłużne dochodzące nawet do 30,8‰, co jest spotykane jedynie na szlakach górskich. Dodatkowo, wybrane tory posiadają stosunkowo małe promienie skrętu lub są ułożone w kształcie litery „S”. Ma to na celu odwzorowywanie dynamicznych i szybkozmiennych warunków na szlaku. Plany badawcze zakładały przeprowadzenie przejazdów na torach różniących się od siebie charakterystyką pochyłeń podłużnych. Wytypowano tory, które miały zapewnić szeroką możliwość badawczą. W tabeli 6.8 przedstawione zostały profile i najważniejsze dane dotyczące wybranych torów.

Tab. 6.8. Dane techniczne tras wybranych do przejazdów podczas badań

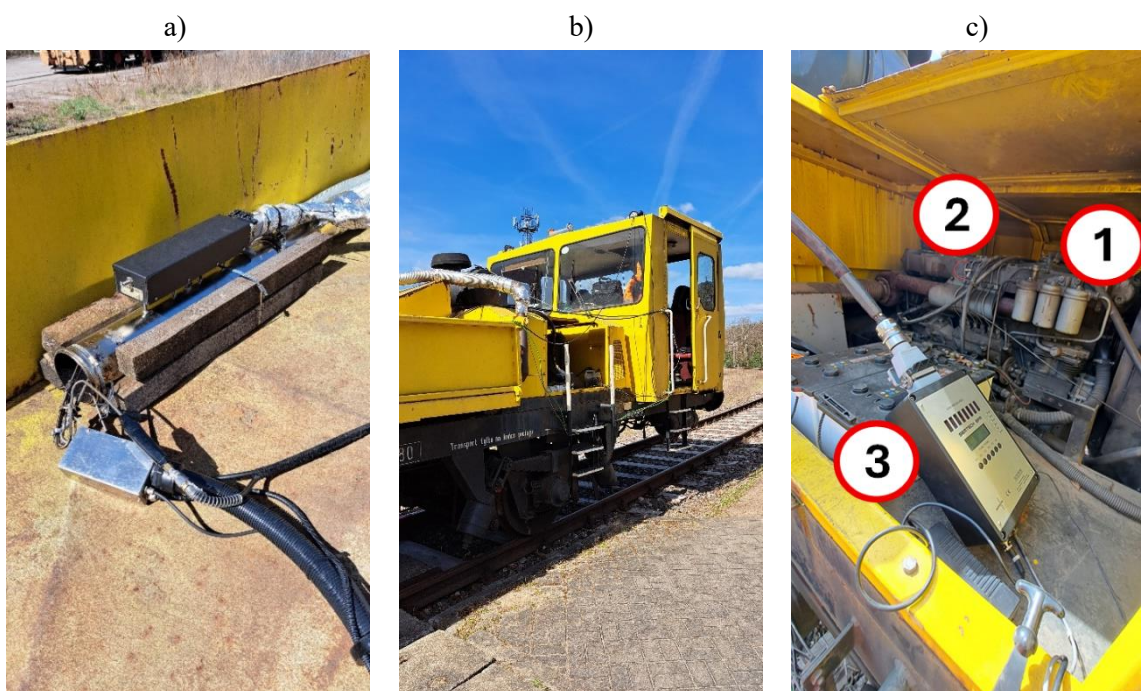
| Trasa | Całkowita długość (m) | Profil i kierunek jazdy                                    |
|-------|-----------------------|------------------------------------------------------------|
|       |                       | (nad – pochylenie podłużne (‰); pod – długość odcinka (m)) |
| A     | 824                   |                                                            |
|       |                       |                                                            |
| C     | 135                   | poziomy                                                    |
| D     | 350                   | poziomy                                                    |

#### Uzbrojenie pojazdu w aparaturę pomiarową

Odpowiednie przygotowanie pojazdu przed badaniami jest bardzo istotnym czynnikiem w celu uzyskania wartościowych i poprawnych wyników. Pojazd WM-15A składa się z trzech podstawowych przestrzeni wchodzących w skład nadwozia. Pierwszą i największą z nich jest przestrzeń ładunkowa o powierzchni 16,5 m<sup>2</sup>. Przy tak licznie wykorzystanej aparaturze pomiarowej naturalnym stało się wykorzystanie tej przestrzeni do rozmieszczenia największych pod względem gabarytów urządzeń i oprzyrządowania. Na rysunku 6.10 przedstawiono rozmieszczenie sprzętu pomiarowego w przestrzeni ładunkowej. Wózek motorowy nie jest wyposażony w gniazda elektryczne 230 VAC, z których można zasiląć aparaturę. Z tego powodu, oprócz aparatury PEMS, umieszczono tam również dwa agregaty prądotwórcze, niezbędne do zapewnienia ciągłej pracy wszystkich urządzeń elektrycznych.



Rys. 6.10. Przestrzeń ładunkowa WM-15A, na której rozmieszczono większość aparatury pomiarowej i sprzęt potrzebny do jej obsługi: 1 – kanał odprowadzenia spalin, 2 – przepływomierz, 3 – sondy pomiarowe, 4 – agregat prądowórczy, 5 – MSS, 6 – EEPS, 7 – okablowanie prowadzące do komputerów w kabinie



Rys. 6.11. Pojazd uzbrojony do badań: a) przepływomierz z sondami pomiarowymi na wylocie spalin, b) przewody aparatury prowadzące do kabiny pojazdu, c) komora silnika: 1 – silnik, 2 – czujnik do pomiaru sygnału wtřysku, 3 – moduł elektroniczny przepływomierza

W przypadku przepływomierza, a właściwie modułu elektronicznego, który wymaga pracy w odpowiedniej pozycji, niezbędne było bezpieczne zamontowanie urządzenia. Aparatura została umieszczona przy burcie pojazdu i unieruchomiona. Następnie do wylotu kanału zostały wprowadzone sondy pomiarowe urządzeń PEMS, w celu pobierania próbek spalin (Rys. 6.11a).

Aparaturę PEMS można podzielić ze względu na sposób rejestracji i zapisywania danych. Część aparatury, np. Axion, posiada możliwość obsługi, rejestracji i zapisywania wyników pomiarów na własnym sprzęcie. Axion działa jak PEMS połączony z komputerem. Pozostałe urządzenia, które nie posiadają takiej możliwości, muszą zostać podłączone do komputerów wyposażonych w dedykowany software. Maszynista oraz obsługa badań wraz z komputerami (Rys. 6.12) podczas przejazdów przebywała w kabinie, tj. drugiej pod względem przestrzeni na pojeździe. Z tego powodu

okablowanie oraz wybrane przewody z próbkami spalin, prowadzące do kabiny, zostały poprowadzone i zamocowane wzdłuż prawej burty pojazdu, obok przedziału silnikowego (Rys. 6.11b).

W komorze silnika (Rys. 6.11c) umieszczono również część okablowania, a także moduł elektroniczny przepływomierza. Istotnym elementem było podłączenie czujnika do przewodów wtryskowych z paliwem pod wysokim ciśnieniem, które biegną od rzędowej pompy wtryskowej do wtryskiwacza. Czujnik wytwarza sygnał elektroniczny w czasie zmiany ciśnienia w przewodzie wtryskowym, które jest wywoływane cyklicznie poprzez wtryskiwanie dawki paliwa do komory spalania. Dzięki temu możliwa była rejestracja prędkości obrotowej silnika. Zabieg ten był wymuszony ze względu na brak zastosowania na pojeździe systemu diagnostycznego. Pojazd posiada jedynie podstawowe urządzenia do pomiaru wybranych parametrów.



Rys. 6.12. Wnętrze kabiny WM-15A: po lewej stronie znajdują się komputery rejestrujące wyniki pomiarów, po prawej stronie aparatura PEMS Axion R/S+™

Dla pojazdów typu NRMM normy emisji spalin odnoszą się do emisji jednostkowej, tj. masy lub liczby poszczególnych związków odniesionych do wykonanej pracy (kWh). Jednakże w przypadku badań starszych pojazdów w rzeczywistych warunkach eksploatacji, często jest to niemożliwe ze względu na brak możliwości pomiaru lub odczytu wartości mocy. W przypadku nowszych pojazdów, informację na temat aktualnej mocy silnika podczas pracy można zarejestrować bezpośrednio z komputera pokładowego lub systemu diagnostycznego. Starsze pojazdy nie posiadają takich układów i są zazwyczaj wyposażone w proste urządzenia pomiarowe np. dla prędkości pojazdu czy prędkości silnika spalinowego. Dodatkowo pomiar takich parametrów jest możliwy za pomocą urządzeń zewnętrznych, jednak brak jest możliwości rejestracji mocy lub momentu obrotowego. Z tego powodu w badaniach zdecydowano się na odnoszenie wyników pomiarów w inny sposób, niż wymagają tego normy emisji spalin dla pojazdów typu NRMM.

## 7. Badania rzeczywistej charakterystyki pracy i emisji spalin

### 7.1. Charakter pracy pojazdu specjalnego

#### Pojazd

W celu przeprowadzenia docelowych badań na rzeczywistym obiekcie wytypowano pojazd specjalnego przeznaczenia WM-15A z zastosowanym silnikiem SW680. Podstawowymi wyznacznikami wyboru maszyny była duża liczba i dostępność pojazdów, znaczna przestrzeń ładunkowa umożliwiająca zamontowanie w bezpieczny sposób aparatury pomiarowej w dalszych etapach badań, a także stosunkowo prosta konstrukcja. Drezyna WM-15A jest wózkiem motorowym produkowanym w latach 1977–1996. Zakłady Naprawcze Taboru Kolejowego w Stargardzie Szczecińskim wyprodukowały łącznie 555 sztuk tych jednostek [129,130]. Pojazdy są eksploatowane głównie przez przedsiębiorstwa zajmujące się utrzymaniem infrastruktury kolejowej. Są to między innymi PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., PGE Energetyka Kolejowa S.A., PKP Intercity S.A., WKD, ZUE S.A., Kolejowe Przedsiębiorstwo Remontowo-Produkcyjne KOLMECH Sp. z o.o., Zakład Robót Komunikacyjnych – DOM Sp. z o.o.

Powstały dwie wersje wózka motorowego serii WM-15:

- WM-15A – podstawowa wersja wyposażona w skrzynię ładunkową z żurawiem hydraulicznym o udźwigu do 1,5 t.
- WM-15P – wersja dla pogotowia sieciowego wyposażona m.in. w umieszczony na platformie wysięgnik koszowy o maksymalnej wysokości podnoszenia 11 m i udźwigu 200 kg.

#### Parametry przejazdowe

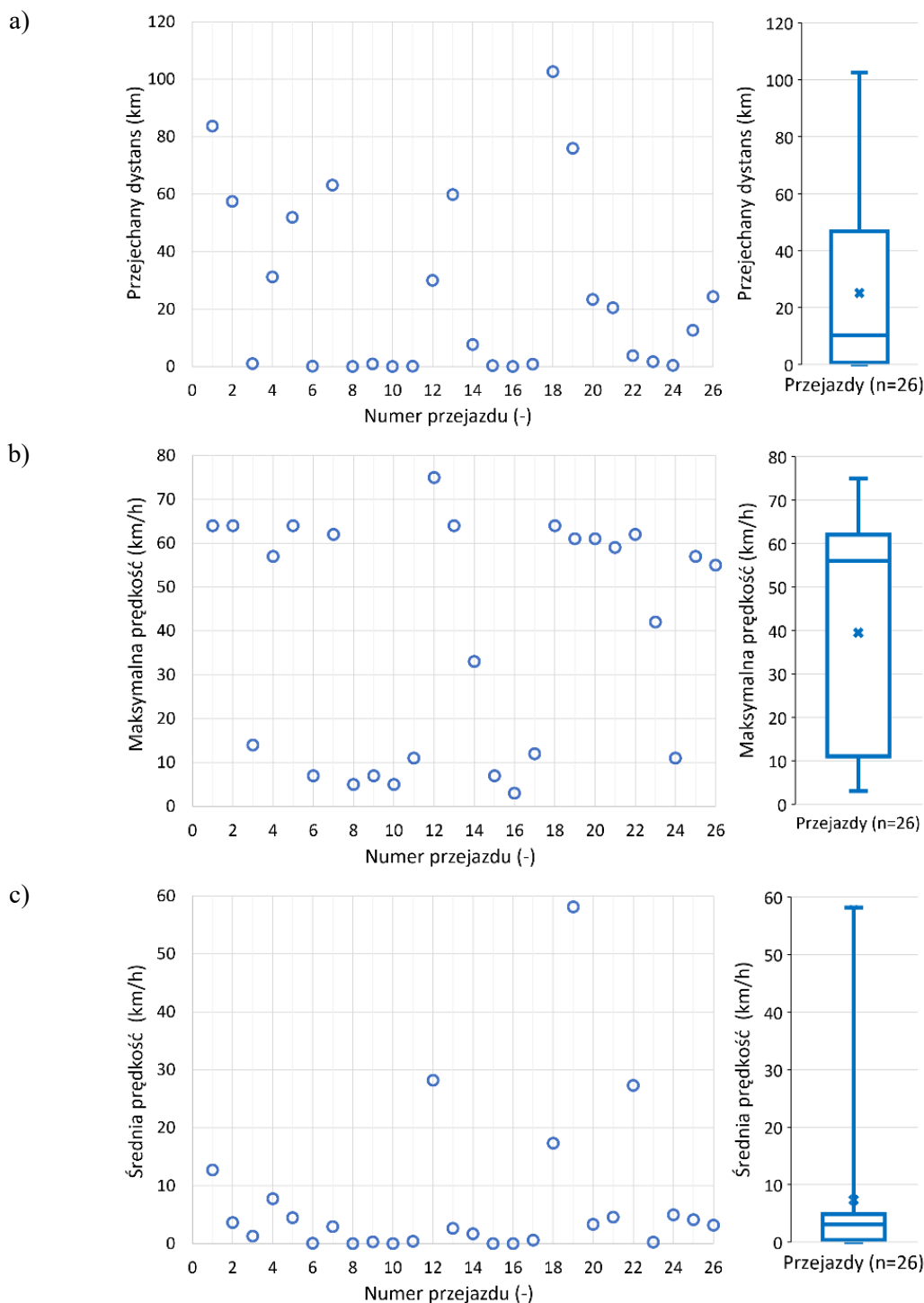
Na potrzeby opracowania planu badań oraz obliczeń, pozyskano i przeanalizowano dane dotyczące eksploatacji pojazdu WM-15A. Dane dotyczą użytkowania pojazdu firmy zajmującej się utrzymaniem oraz robotami na infrastrukturze kolejowej i dotyczą okresu trzech tygodni tj. od 3 stycznia do 23 stycznia 2024 roku. Podczas tego okresu wykonanych zostało 26 przejazdów. Charakter pracy maszyn specjalnego przeznaczenia zależy od rodzaju aktualnie prowadzonych prac. W zależności od zapotrzebowania, pojazd w ciągu dnia może nie być uruchamiany lub być wykorzystany kilka razy dziennie np. praca podczas kilku zmian, lub w różnych miejscach. Pojazd, pomimo tego, że służy głównie do transportu rzeczy, może pracować stacjonarnie, tj. stojąc w miejscu lub przejechać podczas zmiany jedynie bardzo niewielki dystans. Pracujący silnik jest niezbędny np. do napędu żurawia, którym wykonywane są prace takie jak rozładunek/załadunek szyn czy wymiana podkładów lub rozjazdów kolejowych.

Na rysunku 7.1 przedstawione zostały dane dla każdego z przejazdów dotyczące trzech parametrów: przejechanego dystansu, maksymalnej prędkości jazdy jaka została zarejestrowana podczas przejazdu oraz średniej prędkości przejazdu, w tym wliczone postoje i praca stacjonarna. Dla każdego z opisywanych wskaźników zostały stworzone wykresy pudełkowe z wąsami. Zawierają one informacje dla grupy 26 przejazdów dotyczące wartości: minimalnej i maksymalnej – wąsy, średniej – krzyżyk, mediany – linia środkowa, 25-ty i 75-ty percentyla – zakres dolny i górny wykresu pudełkowego.

Spośród 26 przejazdów znaczna ich część odznaczała się względnie krótkim dystansem (Rys. 7.1a). Potwierdza to mediana równa 10,2 km. Oznacza to, że połowa przejazdów była realizowana na dystansie krótszym niż 10,2 km. Średnia wartość dla pokonywanego dystansu podczas przejazdu wyniosła 25,2 km. Pomimo niskiej wartości mediany, średnia jest 2,5-razy większa przede wszystkim ze względu na czwarty kwartył (75% – 99%) danego zbioru. Przedział ten zawiera wartości od 46,8 km do 102,6 km. Podsumowując, według dostępnych danych, połowa przejazdów została zrealizowana na dystansie do 10,2 km. Jednakże 34,6% przejazdów zostało zrealizowanych na dystansie równym bądź większym niż 30 km, a 26,9% odbyło się na dystansie większym niż 50 km. Trasa dwóch najdłuższych przejazdów wynosiła kolejno 102,6 km oraz 83,7 km.

Dla każdego z przejazdów zarejestrowana została maksymalna prędkość (Rys. 7.1b). W 10 przypadkach, tj. 38,5%, maksymalna prędkość wynosiła 15 km/h lub mniej. Z tego powodu 25-ty percentyl był równy zaledwie 11 km/h, a najmniejsza wartość 3 km/h. Prawdopodobnie są to przypadki, gdy główna część pracy była wykonywana w warunkach stacjonarnych lub na obszarach wymagających bardzo małej prędkości, jak np. obszar przemysłowy lub obszar

napraw / utrzymania linii kolejowej. Średnia dla opisywanego wskaźnika była równa 39,5 km/h, jednak w przedziale 20 – 50 km/h zarejestrowano jedynie dwa przejazdy. Zdecydowanie najwięcej przypadków zawiera się w prędkości powyżej 50 km/h, tj. 14 przejazdów – 53,8%. Potwierdza to w szczególności trzeci kwartyl, gdzie mediana wynosiła 56 km/h, a 75-ty percentyl 62 km/h. Największa prędkość maksymalna w zestawieniu była równa 75 km/h.



Rys. 7.1. Dane dotyczące 26 przejazdów pojazdu specjalnego WM-15: a) przejechany dystans, b) maksymalna prędkość przejazdu, c) średnia prędkość dla danego przejazdu, gdzie: 25-ty i 75-ty percentyl - wykres pudełkowy; mediana - linia środkowa; średnia - krzyżyk; maksimum i minimum - wąsy

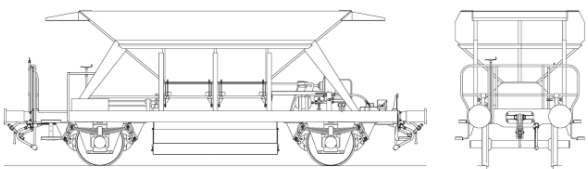
Dane dotyczące średniej prędkości przejazdów mogą wiele świadczyć na temat charakterystyki pracy pojazdu oraz warunków jezdnych. Ze względu na najniższy priorytet na szlaku kolejowym, pojazdy specjalnego przeznaczenia muszą czekać jako ostatnie na wydanie zgody na przejazd przez dyspozytora ruchu. W tym czasie pojazd z działającym silnikiem spalinowym oczekuje w wyznaczonym miejscu na pozytywną informację radiową lub sygnał świetlny na semaforze, jednocześnie przepuszczając składy pasażerskie i towarowe. Z wymienionych wyżej powodów średnia prędkość dla 26 przejazdów wyniosła zaledwie 7,3 km/h (Rys. 7.1c). Dla 75-tego percentyla wartość wyniosła 4,9 km/h. Jeszcze niższe wartości przypadły dla mediany, tj. 3,1 km/h. Za tak niskie wartości odpowiada przede wszystkim liczba 21 przejazdów, tj. 80,8%, których średnia prędkość była mniejsza niż 10 km/h. Liczba przejazdów dla średniej prędkości mniejszej niż 20 km/h wyniosła 23, tj. 88,5%. Zaledwie 3 przejazdy (11,5%) zostały zrealizowane ze średnią prędkością większą niż 20 km/h.

### Rzeczywista eksploatacja pojazdu WM-15A

W kolejnym etapie prac przeprowadzone zostały całodienne pomiary dla pojedynczego pojazdu WM-15A. Celem pomiarów było oszacowanie charakterystyki pracy wytypowanego pojazdu. Głównym zadaniem tego dnia były prace utrzymaniowe na odcinku kolejowym w okolicy stacji kolejowej Palędzie. Prace polegały na uzupełnieniu, dwoma wagonami samowyładowczymi serii FIIs typu 203V do przewozu kruszywa, tłucznia w miejscach, gdzie nastąpił ubytek materiału. Napelnięty wagon ważył około 35 ton, co oznacza, że przy pełnych dwóch wagonach pojazd miał na haku około 70 ton. Przedstawiono dane techniczne wagonu (Tab. 7.1) oraz obciążenie podczas różnych rodzajów prac (Tab. 7.2). Przedstawione zostały działania i rodzaj prac (Rys. 7.2a), rozkład prędkości pojazdu z wyszczególnieniem wykonywanych prac (Rys. 7.2b) oraz mapa przejazdów i wykonywanej pracy (Rys. 7.2c). Cały dzień pracy pojazdu WM-15A był rejestrowany przez system GPS. Pomiary trwały 23925 sekund, tj. 6 godzin i 39 minut. W tym czasie pojazd pokonał dystans 76,1 km, ze średnią prędkością jazdy 30,1 km/h.

Podczas całego dnia pracy, tj. jednej 12h zmiany roboczej pojazd wykonywał zróżnicowane działania, tj. przygotowanie pojazdu (A), manewrowanie (B), jazda – puste wagony (C), załadunek tłucznia (D), jazda – pełne wagony (E), praca (F), praca – żuraw (F'), przerwa (G) (Rys. 7.2a). Pojazd na początku był przygotowywany do prac w bazie przedsiębiorstwa, znajdującej się blisko stacji kolejowej Poznań Główny. W tym czasie silnik pracował na biegu jałowym. Następnie przeprowadzone zostały prace manewrowe, mające na celu sprzęgnięcie dwóch wagonów do przewozu tłucznia z pojazdem WM-15A. Po tym działaniu, nastąpił przejazd z pustymi wagonami (1-C), poprzez stację Poznań Główny, do bazy zaopatrzeniowej w okolicach rejonu Kobylepole (Rys. 7.2c). Przed przybyciem do docelowego miejsca załadunku doszło do prac manewrowych, gdzie pojazd został rozprzęgnięty od wagonów. Następnie pojazd musiał dokonać manewrowania w celu sprzęgnięcia wagonów od drugiej strony, względem pierwotnego położenia w składzie. Po tym procesie skład wjechał do punktu załadunku, a następnie dwa wagony zostały załadowane tłuczniem za pomocą ładowarki kołowej (Rys. 7.3a).

Tab. 7.1. Dane techniczne wagonu serii FIIs typu 203V do przewozu tłucznia

| Parametr            | Wartość | Jednostka      | Rysunek techniczny                                                                   |
|---------------------|---------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Długość             | 9 140   | mm             |  |
| Wysokość            | 3 340   | mm             |                                                                                      |
| Rozstaw osi         | 5 000   | mm             |                                                                                      |
| Masa                | 11 400  | kg             |                                                                                      |
| Granica obciążenia  | 28 500  | kg             |                                                                                      |
| Pojemność ładunkowa | 17      | m <sup>3</sup> |                                                                                      |
| min. promień łuku   | 75      | m              |                                                                                      |
| maks. prędkość      | 100     | km/h           |                                                                                      |

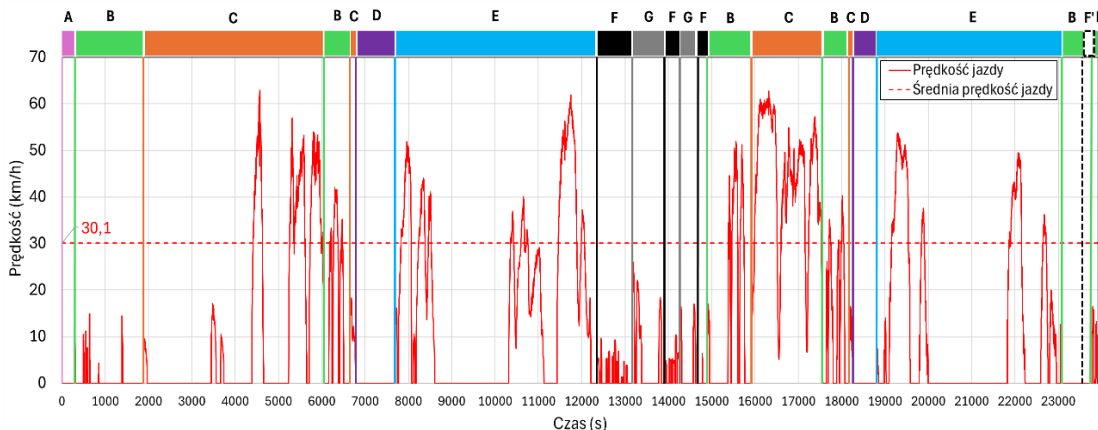
Tab. 7.2. Masa ciągniętego ładunku

| Rodzaj pracy          | Charakterystyka obciążenia              | Masa ciągniętego ładunku | Jednostka |
|-----------------------|-----------------------------------------|--------------------------|-----------|
| Przygotowanie pojazdu | Brak obciążenia                         | 0                        | kg        |
| Manewrowanie          | Brak obciążenia                         | 0                        | kg        |
| Jazda puste wagony    | 2 puste wagony                          | 22 800                   | kg        |
| Łaładunek tłucznia    | 2 wagony – brak obciążenia              | 0                        | kg        |
| Jazda – pełne wagony  | 2 pełne wagony                          | ok. 70 000               | kg        |
| Praca                 | 2 wagony (zakres od pełnych do pustych) | 22 800 – ok. 70 000      | kg        |
| Praca - żuraw         | Napęd pompy hydraulicznej żurawia       | 0                        | kg        |
| Przerwa               | 2 wagony (zakres różnicowany)           | ok. 35 000 – ok. 55 000  | kg        |

a)

| Kolor | Symbol | Rodzaj pracy          | Działania                                                       |
|-------|--------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------|
|       | A      | Przygotowanie pojazdu | Prace przygotowawcze przed wyjazdem                             |
|       | B      | Manewrowanie          | Sprzęganie, rozprzęganie wagonów, jazdy manewrowe               |
|       | C      | Jazda - puste wagony  | Przejazd z 2 pustymi wagonami do przewozu tłuczni               |
|       | D      | Ładunek tłuczni       | Ładunek tłuczni za pomocą spycharki                             |
|       | E      | Jazda - pełne wagony  | Przejazd z 2 pełnymi wagonami do przewozu tłuczni               |
|       | F      | Praca                 | Rozsypywanie tłuczni na torowisku                               |
|       | F      | Praca - żuraw         | Ładunek podkładu kolejowego na pojazd za pomocą żurawia         |
|       | G      | Przerwa               | Zechanie z miejsca pracy ze względu na przejazd innych pojazdów |

b)



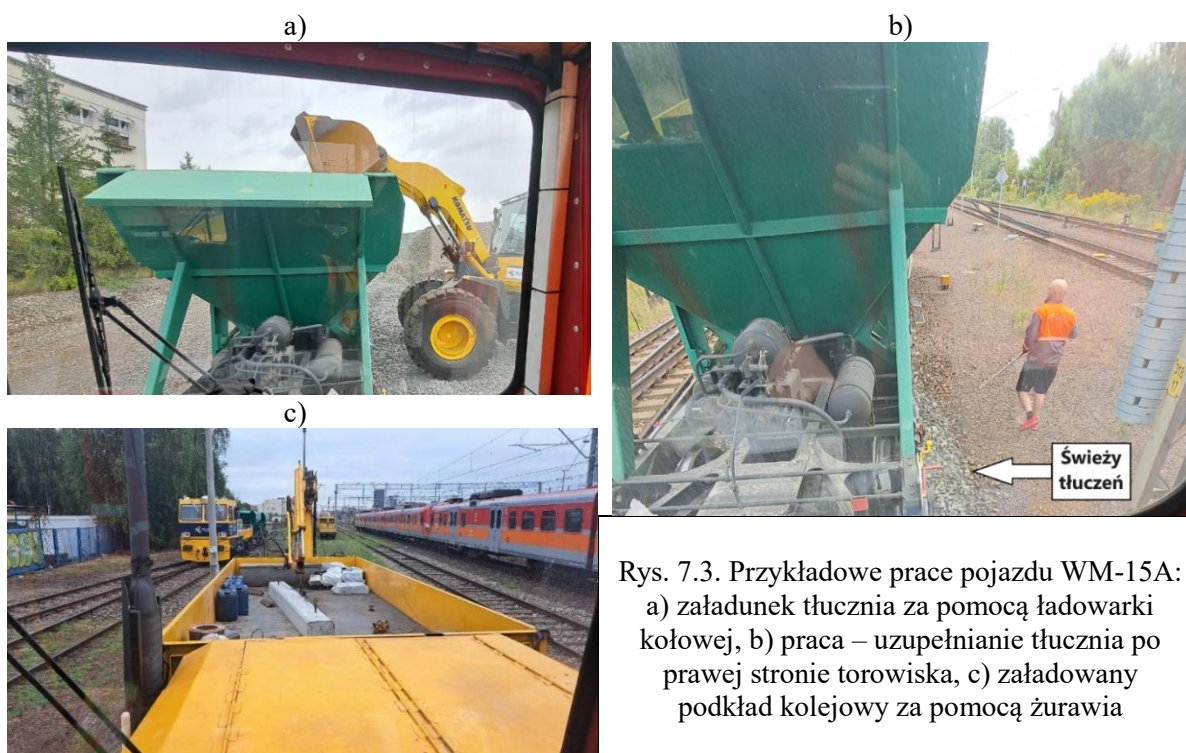
c)



Rys. 7.2. Przebieg prac i przejazdów podczas jednego dnia pracy pojazdu WM-15A:

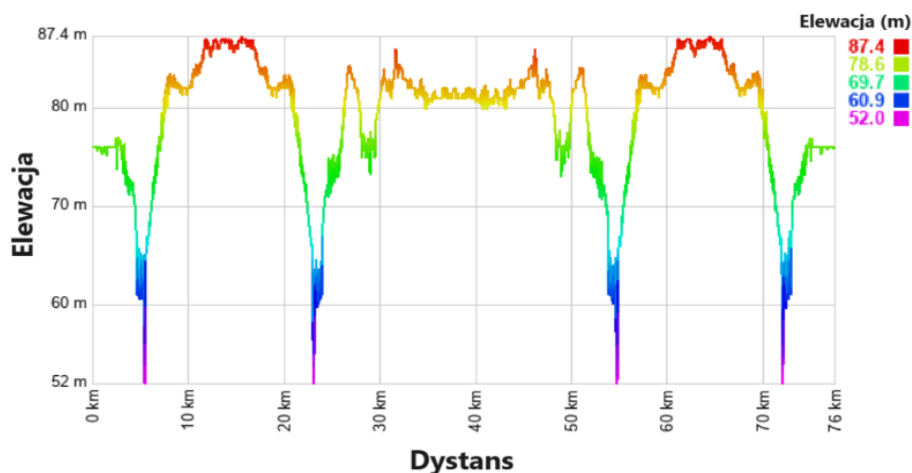
a) podział ze względu na rodzaj prac, b) wykres prędkości pojazdu wraz z zaznaczonymi rodzajami prac, c) mapa punktów pracy i przejazdów: Start → 1-C → 2-E → 3-C → 4-E → Stop

Następnie pojazd musiał wykonać prace manewrowe mające na celu zmianę położenia w składzie. Powodem była konieczność prowadzenia składu w drodze powrotnej z pojazdem WM-15A na początku. Po ustawieniu pojazdu we właściwy sposób nastąpił przejazd do punktu zaopatrzenia w okolicach Kobylepole z pustymi wagonami (3-C). Ponownie - przed wjechaniem do punktu załadunku - załoga musiała rozprzęgnąć pojazd od wagonów, ustawić pojazd z drugiej strony wagonów, sprzęgnąć pojazd. Dopiero wtedy możliwe było wjechanie na załadunek. Tłuczeń został załadowany do dwóch wagonów, które miały być opróżnione podczas pracy na następnej zmianie. Nastąpił powrót z dwoma pełnymi wagonami do bazy przedsiębiorstwa (4-E), znajdującej się w okolicy stacji Poznań Główny. Po dojechaniu na miejsce wykonano prace manewrowe, mające na celu odstawienie wagonów na bocznym torze. Następnie - ze względu na planowane na następnej zmianie prace - załadowany został podkład kolejowy na przestrzeń ładunkową, za pomocą żurawia znajdującego się na pojeździe (Rys. 7.3c).



Rys. 7.4. Pojazd WM-15A z dwoma załadowanymi wagonami do przewozu tłucznia

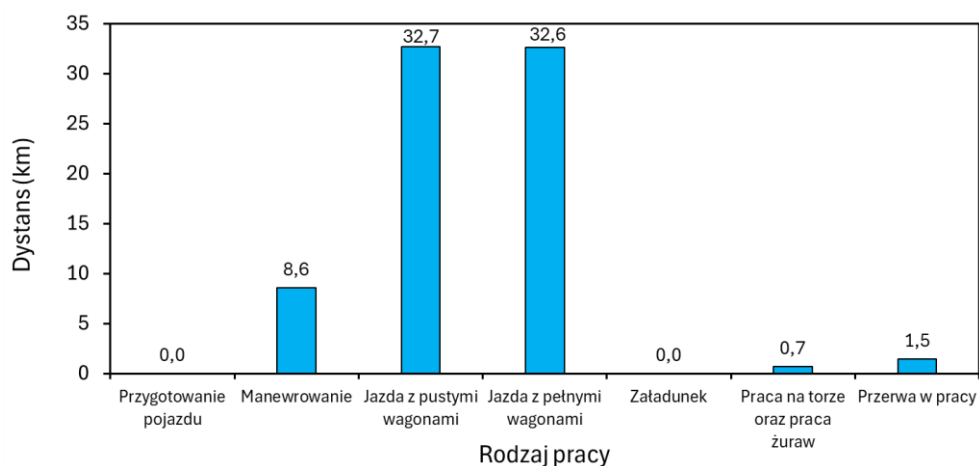
Po wykonaniu wyżej wymienionych prac pojazd wykonał przejazdy w celu ustawienia go na odpowiednim torze, obok załadowanych wagonów, przed wykorzystaniem go na następnej zmianie (Rys. 7.4). Podczas przejazdu zarejestrowana została charakterystyka elewacji terenu, po której poruszał się pojazd (Rys. 7.5). Najwyższym położonym punktem 87,4 m n.p.m. okazał się punkt zaopatrzenia przedsiębiorstwa. Z kolei najniższym punktem był most kolejowy na rzece Warcie, położony 52 m n.p.m. Pojazd poruszał się po liniach o pochyleniach nie większych niż 6 ‰.



Rys. 7.5. Elewacja terenu podczas zarejestrowanego przejazdu

#### Szczegółowe dane pracy

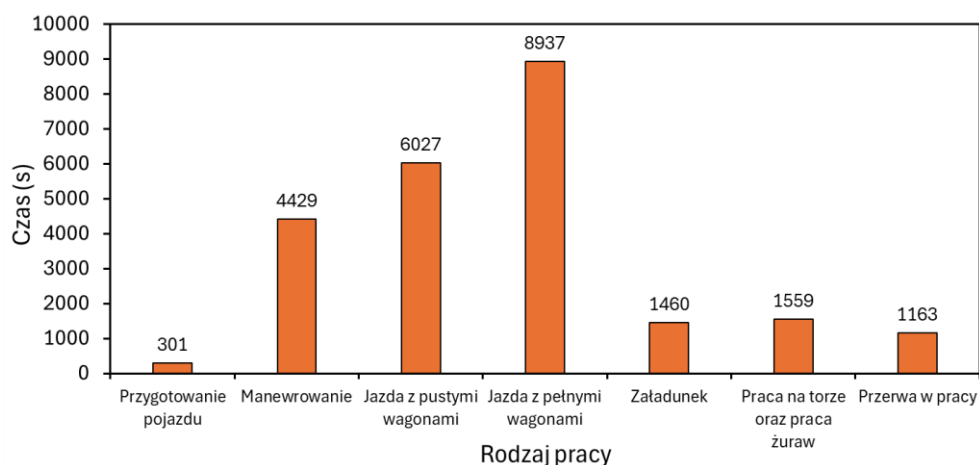
Dane zarejestrowane podczas pomiarów posłużyły do dalszych analiz. Istotnymi danymi były przejechany dystans i udział czasu pracy dla poszczególnych rodzajów prac, a także udziały czasu jazdy w danych zakresach prędkości. Praca na torze podczas uzupełniania tłucznia oraz praca żurawiem zostały sklasyfikowane w jednej grupie. Podczas całego dnia pracy pojazd przejechał łącznie 76,1 km. Największy, niemal identyczny dystans, został pokonany w przypadku jazdy z pustymi oraz pełnymi wagonami tj. ok. 32,6 km (Rys. 7.6). Łącznie te dwa rodzaje przejazdów odpowiadają za 86% całego przejechanego dystansu. Podczas prac manewrowych został przejechany trzeci najdłuższy dystans, tj. 8,6 km (12%). Przez cały dzień pracy sześciokrotnie dochodziło do prac manewrowych, co daje średni dystans 1,43 km na wykonanie jednego procesu manewrowania. Należy mieć na uwadze, że dystans pokonywany podczas prac manewrowych zależy od charakterystyki torów i rozlokowania rozjazdów, po których porusza się pojazd. W przypadku linii kolejowych, dystans pomiędzy rozjazdami może być znaczny, co wpływa na konieczność przejechania dużych odległości. Z kolei na bocznicach kolejowych rozjazdy zazwyczaj znajdują się w bliższej odległości od siebie, w celu sprawniejszego manewrowania.



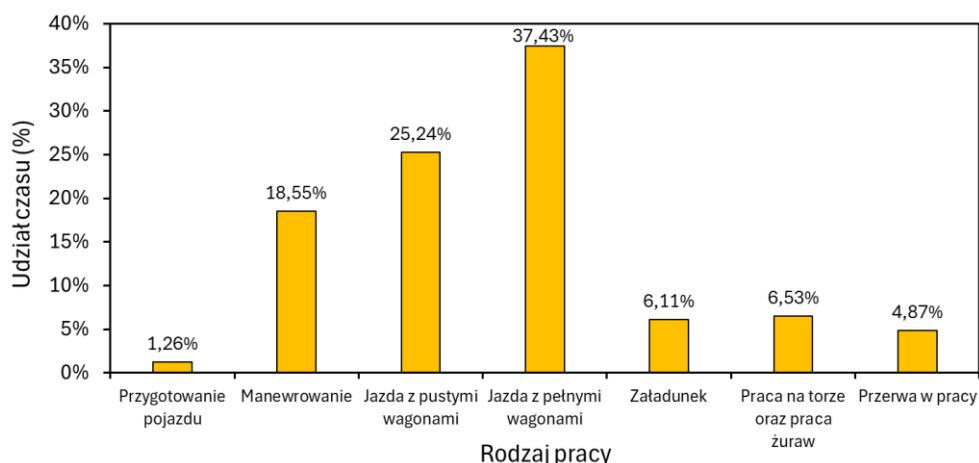
Rys. 7.6. Pokonany dystans dla poszczególnych rodzajów prac

W przypadku dwukrotnej realizacji przerw w wykonywaniu robot torowych, czyli zjazdu na boczny tor w celu przepuszczenia pociągów, ogółem został pokonany dystans 1,5 km. Z kolei docelowe prace, czyli uzupełnianie tłucznia na torowisku oraz praca żurawiem, wymagały pokonania jedynie 0,7 km, tj. niecały 1% ogólnego dystansu. Warto zauważyć, że w związku z tym, etap ten wymaga przejechania najmniejszego dystansu spośród wszystkich rodzajów prac. Uzupełnianie tłucznia odbywało się na odcinkach wymagających utrzymania, a dystans na którym odbywała się praca był ograniczony ilością tłucznia znajdującego się w wagonach. Zadania związane z przygotowaniem pojazdu oraz załadunek nie wymagały przejazdów. Podczas ich realizacji pojazd stał, a silnik spalinowy pracował na biegu jałowym.

W przypadku czasów pracy przypadających na poszczególne rodzaje prac, najbardziej czasochłonnym etapem była jazda z pełnymi wagonami, która wyniosła 8937 s (Rys. 7.7). Działanie to stanowiło 37,43% ogólnego czasu pracy (Rys. 7.8). Drugim pod względem potrzebnego czasu działaniem była jazda z pustymi wagonami, która zajęła 25,24% (6024 s). Biorąc pod uwagę identyczny dystans dla obu przypadków wydaje się, że jazda z pełnymi wagonami mogła odbywać się dłużej ze względu na znacznie większe obciążenie pojazdu. Jednakże rzeczywistą przyczyną wydłużonych czasów przejazdów załadowanego składu był czynnik losowy. Podczas przejazdów wymuszone były postoje przed semaforami ze względu na większy priorytet innych przejeżdżających pojazdów.



Rys. 7.7. Czas pracy dla poszczególnych rodzajów prac



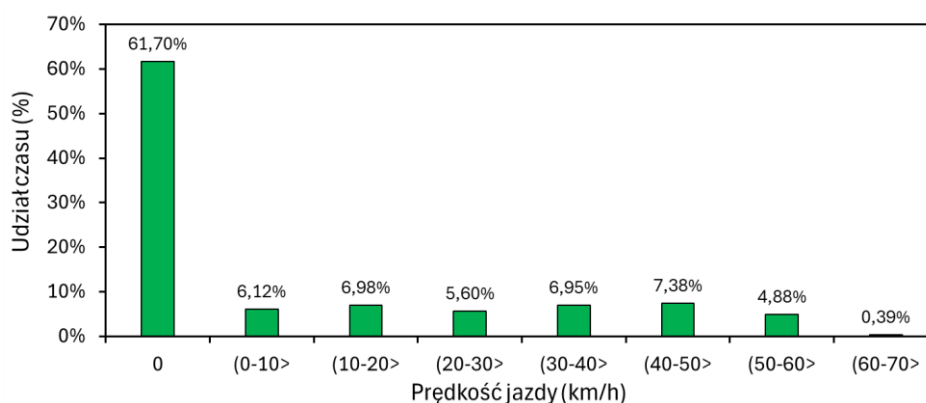
Rys. 7.8. Udział czasu dla poszczególnych rodzajów prac

W obu przypadkach jazdy z pełnymi wagonami, pojazd natrafił na przejazdy planowane według rozkładu, co w połączeniu z najmniejszym priorytetem przejazdu oznaczało konieczność postoju przed mostem kolejowym Poznań Starołęka. Pierwszy postój trwał 1706 s (28 min i 26 s), a drugi 1824 s (30 min i 24 s). Dwa wymienione postoje zajęły niemal godzinę i stanowiły 14,8% całkowitego zarejestrowanego czasu oraz 39,5% całkowitego czasu jazdy z pełnymi wagonami. Należy wspomnieć

o tym, że nie były to jedyne postoje podczas przejazdów. Przeprawa przez most kolejowy nad rzeką Wartą stanowi wąskie gardło, co jest bardzo kłopotliwe szczególnie dla pojazdów o niskim priorytecie przejazdowym, jak na przykład pojazdy specjalnego przeznaczenia.

Manewrowanie pojazdu stanowiło 18,55% całkowitego czasu przejazdu (4429 s). Proces zmiany położenia pojazdu względem wagonów, który był potrzebny w celu ustawienia pojazdu WM-15A na początku składu do kierunku jazdy, zajął w sumie ponad 1 h 13 min. Średnia z sześciu procesów manewrowania wyniosła ponad 12 min. Należy pamiętać, że manewrowanie odbywało się zarówno na bocznicach jak i na regularnej linii kolejowej. W związku z tym większe odległości między zwrotnicami na linii kolejowej oraz konieczność przepuszczania pociągów wpłynęły na wydłużenie czasu trwania tego procesu.

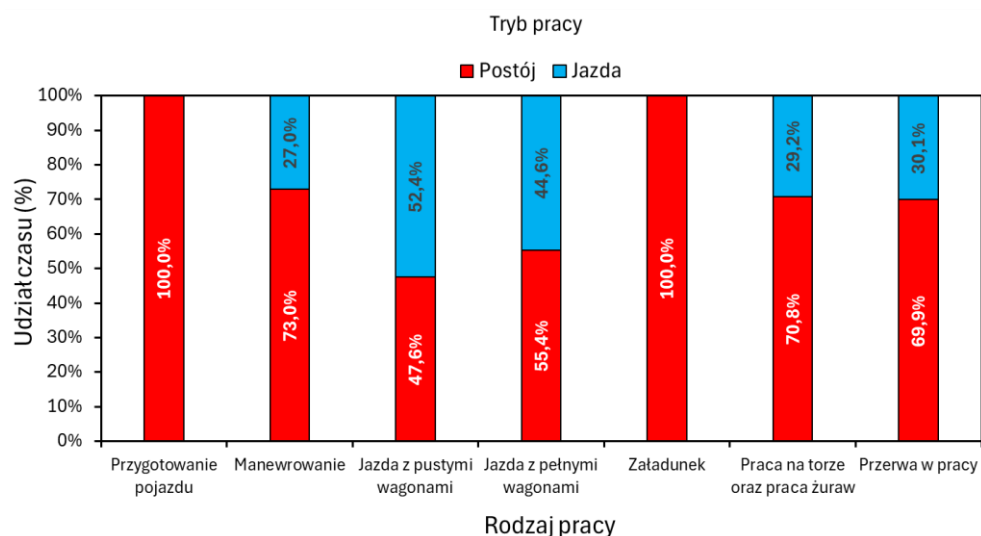
Dla pozostałych rodzajów prac czas ich trwania oraz udział były znacznie mniejsze. Praca na torze oraz praca żurawiem zajęły w sumie 1559 s (26 min), czyli 6,53% całkowitego czasu badań. Bardzo zbliżony czas pracy przypadł na proces dwukrotnego załadunku tłucznia do dwóch wagonów (6,11%). Dwukrotnie wymuszone przerwy w pracy, spowodowane przejazdem pociągów, trwały 1163 s (4,87%). Najmniej czasu zabrało przygotowanie pojazdu na samym początku dnia, kiedy to proces ten zajął nieco powyżej 5 min.



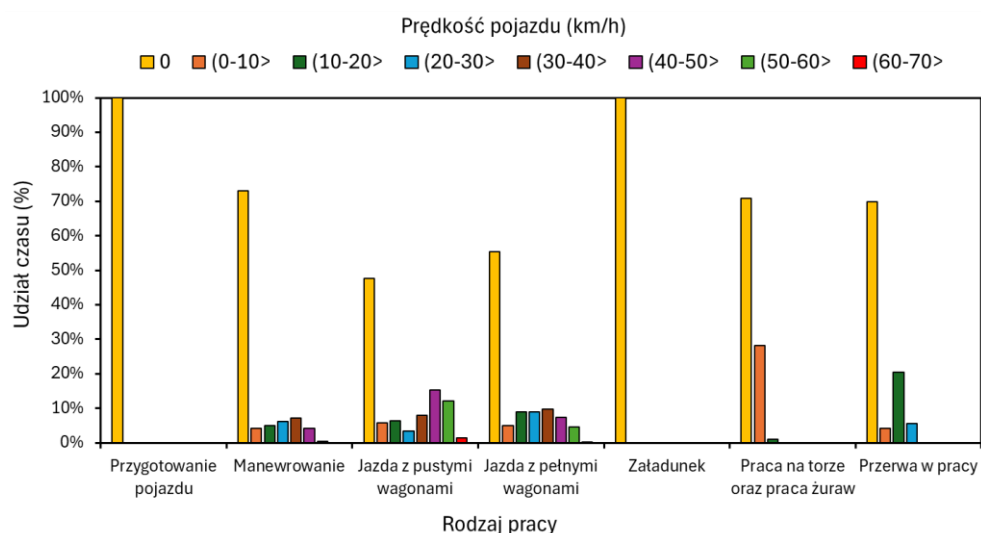
Rys. 7.9. Udział czasu jazdy w poszczególnych zakresach prędkości

Cały dzień pracy drezyny WM-15A został podzielony na przedziały prędkości w jakich się poruszała (Rys. 7.9). Pomimo przejechania w sumie 76 km i wykonania wielu rodzajów prac, pojazd najczęściej wykonywał pracę na biegu jałowym podczas postoju (61,7%). Pojazd stał lub poruszał się z prędkością do 20 km/h przez 74,8% czasu badań. Z kolei przedział prędkości (0-40) km/h stanowił 87,3%. Należy zauważyć, że drugim największym udziałem czasu dla rozpatrywanych zakresów (7,38%) odznaczał się przedział prędkości (40 – 50) km/h. Jednakże pojazd z prędkością większą niż 40 km/h poruszał się jedynie przez 12,7%. W przypadku prędkości większej niż 50 km/h było to 5,3% czasu, a powyżej 60 km/h jedynie 0,39%. Z zebranych danych wynika, że pojazd głównie stał lub poruszał się z małymi lub umiarkowanymi prędkościami, pomimo realizacji przejazdów po liniach kolejowych. W przypadku obciążenia silnika spalinowego można założyć, że jednostka napędowa przez większość czasu pracowała przy bardzo małym lub małym obciążeniu.

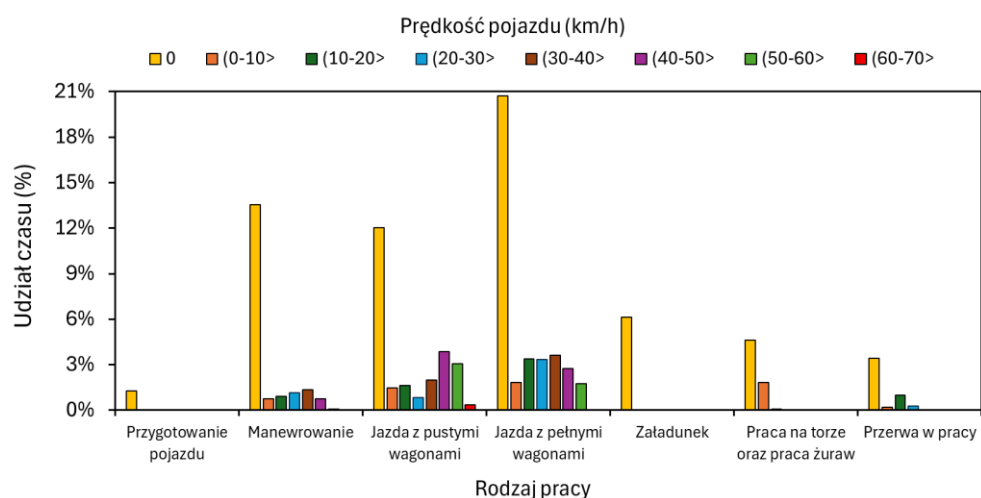
Rozpatrując udziały czasu trybów pracy pojazdu podczas poszczególnych rodzajów prac, wyróżniają się przede wszystkim dane dla postoju (Rys. 7.10). Dotyczy to wszystkich działań. Oznacza to, że bez względu na wykonywane prace, największy udział czasu przypada dla postoju, a w konsekwencji pracy silnika spalinowego na biegu jałowym. Wyjątek stanowi praca żurawia. Podczas tego procesu – pomimo, że pojazd się nie poruszał - to silnik pracował z większą prędkością obrotową niż na biegu jałowym - ze względu na przełożenie napędu silnika spalinowego na napęd hydrauliczny żurawia. Dominujący udział postoju dotyczy niemal wszystkich rodzajów prac, jednak dla prac przygotowawczych oraz załadunku działanie to zajmuje pełen zakres czasu. Ponad połowę czasu pojazd spędził na postoju podczas manewrowania (73%), pracy na torze oraz pracy żurawia (70,8%), przerw w pracy i przejazdach na wyznaczony tor (69,9%) oraz jeździe z pełnymi wagonami (55,4%). Jedynie podczas jazdy z pustymi wagonami pojazd poruszał się przez większość czasu przejazdu (52,4%).



Rys. 7.10. Udziały czasowe trybów pracy pojazdu WM-15A, tj. postój lub jazda, dla poszczególnych rodzajów prac



Rys. 7.11. Udziały zakresów prędkości z jakimi poruszał się pojazd dla poszczególnych rodzajów prac

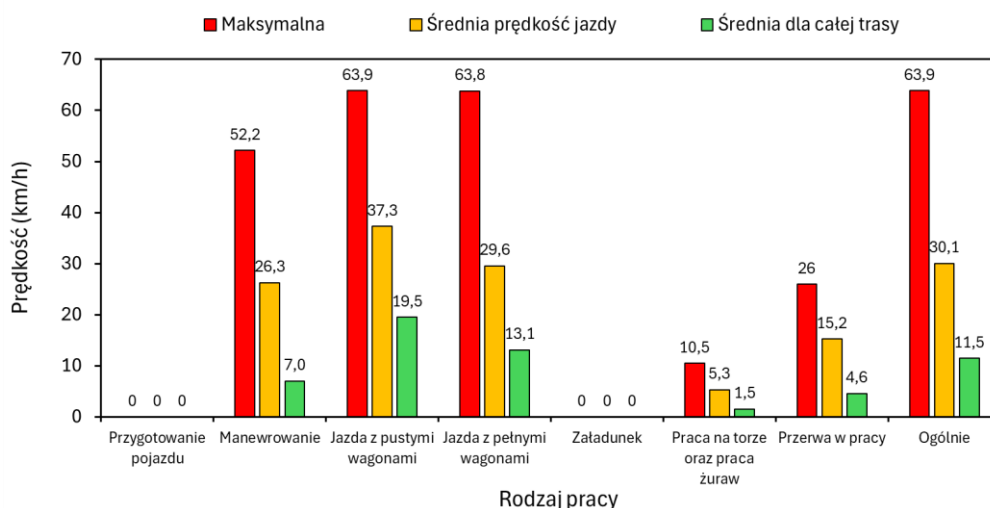


Rys. 7.12. Wartości bezwzględne udziałów czasu pracy przy danych prędkościach z jakimi poruszał się pojazd podczas całego dnia pracy

Biorąc pod uwagę udziały czasu pracy dla zakresów prędkości, w których poruszał się pojazd, podczas poszczególnych działań, wyróżniają się przede wszystkim dane dla prędkości 0 km/h (Rys. 7.11). Dotyczy to również wartości bezwzględnych udziałów czasu pracy przy danej prędkości podczas całego dnia pracy (Rys. 7.12). Udziały czasu jazdy dla wymienionych zakresów prędkości są o wiele mniejsze w porównaniu do postoju. W przypadku manewrowania wszystkie zakresy prędkości stanowią nieznaczny udział. Największy udział zakresu prędkości przy manewrowaniu stanowił zakres (30-40) km/h, tj. 7,2%. Manewrowanie odbywa się głównie przy małych prędkościach, jednak w tym wypadku pojazd poruszał się dość szybko podczas jazdy między zwrotnicami.

Etap jazdy pojazdu z obciążeniem charakteryzował się największymi udziałami czasu pracy w ruchu dla odpowiednich prędkości: (40-50) km/h (15,4%), (50,60) km/h (12,1%) oraz (30,40) km/h (7,9%). Tym samym obiekt badawczy cechował się największym udziałem prędkości przekraczającej 40 km/h spośród wszystkich wykonanych pomiarów. Należy również wspomnieć, że maszyna przez 1,34% czasu pracy poruszała się z prędkością w przedziale (60-70) km/h. Przejazd ten charakteryzował się również bardziej jednorodnym rozkładem gęstości czasowej dla poszczególnych wartości prędkości w porównaniu do przejazdów z pustymi wagonami. Nieobciążony pojazd w trakcie badań charakteryzował się następującymi udziałami czasu pracy dla poszczególnych zakresów prędkości: 4,64% dla (50-60) km/h oraz 9,7% dla (30-40) km/h. Dla zakresu (60-70) km/h udział tych prędkości (0,15%) jest pomijalny.

Podczas całego procesu przygotowania oraz załadunku pojazd spędził na postoju. Dla pracy na torze (oraz wliczonej do statystyk pracy żurawia) pojazd podczas jazdy poruszał się najczęściej z prędkością do 10 km/h (28,1%). Było to spowodowane procesem wysypywania tłucznia, który wymagał odpowiedniego i równomiernego rozłożenia na torowisku. Prędkość w zakresie (10-20) km/h stanowiła jedynie 1,1%. W przypadku wymuszonych przerw w eksploatacji WM-15A przez większość czasu stał na bocznym torze oczekując na przejechanie pociągu (69,9%). Jedynymi okresami, w których się poruszał były zjazd z toru głównego na boczny oraz powrót na miejsce pracy. Największy udział zakresu prędkości stanowiły prędkości w przedziale (10-20) km/h (20,4%). Pozostałymi zakresami były (0-10) km/h (4,2%) oraz (20-30) km/h (5,5%).



Rys. 7.13. Prędkości dla różnych rodzajów prac: maksymalna, średnia podczas jazdy, średnia ogólna

Dla każdego rodzaju prac zostały zarejestrowane lub obliczone: prędkość maksymalna, średnia prędkość jazdy oraz średnia prędkość dla całej trasy wliczając postoje (Rys. 7.13). Prędkość maksymalna 63,9 km/h dla całego przejazdu została osiągnięta podczas jazdy z pustymi wagonami. Niemal bliźniacza wartość 63,8 km/h została osiągnięta podczas jazdy z pełnymi wagonami. W przypadku manewrowania maksymalna osiągnięta prędkość wynosiła 52,2 km/h, co wynikało prawdopodobnie z przejazdu długiego odcinka pomiędzy zwrotnicami. Podczas przerwy w pracy i wynikających z tego powodów wykonywanych przejazdów na inny tor, maksymalna osiągnięta prędkość wyniosła 26 km/h. W przypadku pracy pojazd rozpędził się do najwyższej prędkości równej

10,5 km/h, co może świadczyć o wymaganej dokładności podczas wykonywania tego rodzaju prac utrzymaniowych.

Średnia prędkość jazdy, z której został wykluczony czas postoju, osiągnęła najwyższą wartość 37,3 km/h podczas jazdy z pustymi wagonami. Opisywany parametr dla jazdy z pełnymi wagonami wyniósł 29,6 km/h, manewrowania 26,3 km/h, przerwy w pracy 15,2 km/h oraz 5,3 km/h w przypadku pracy na torze. Średnia wartość dla całego przejazdu wyniosła 30,1 km/h.

Rozpatrując średnią prędkość dla całych tras dla poszczególnych rodzajów prac, która wlicza również postoje, najwyższą wartość wyniosła 19,5 km/h podczas przejazdu z pustymi wagonami. Dla jazdy z pełnymi wagonami było to 13,1 km/h. W przypadku pozostałych rodzajów prac było to 7 km/h dla manewrowania, 4,6 km/h dla przerwy w pracy oraz zaledwie 1,5 km/h dla pracy na torze. Dla całej trasy opisywany parametr wyniósł 11,5 km/h.

## 7.2. Pomiary emisji PM i PN

Badania pomiarów emisji spalin odbyły się na boczniczy kolejowej Ł-PIT. W trakcie badań temperatura wynosiła 12°C. Pogoda była pochmurna z przejaśnieniami, bez deszczu. Wiał umiarkowany północny wiatr, a ciśnienie atmosferyczne wynosiło 1015 hPa. Zaplanowano realizację w sumie 10 przejazdów na 4 różnych trasach. Przejazdy w 6 konfiguracjach (Tab. 7.3) różniły się między sobą między innymi pod względem jazdy na pierwszym biegu lub przy zmianie biegów. Dodatkowo, poprzez znaczne pochYLENIA wybranych torów badawczych, możliwe było odwzorowanie i zadanie obciążenia pojazdowi [130,131]. Wykorzystano również wagon do dodatkowego obciążenia. Wózek motorowy, oprócz sprzętu pomiarowego, nie został wyposażony w żadne inne elementy lub urządzenia, które mogłyby wpłynąć na wyniki badań. Pozwoliło to na zmierzenie rzeczywistych wartości będących punktami odniesienia dla przyszłych działań. Pojazd nie posiadał pozasilnikowych układów oczyszczania spalin. Dodatkowym, siódmym punktem pomiarowym była praca na biegu jałowym.

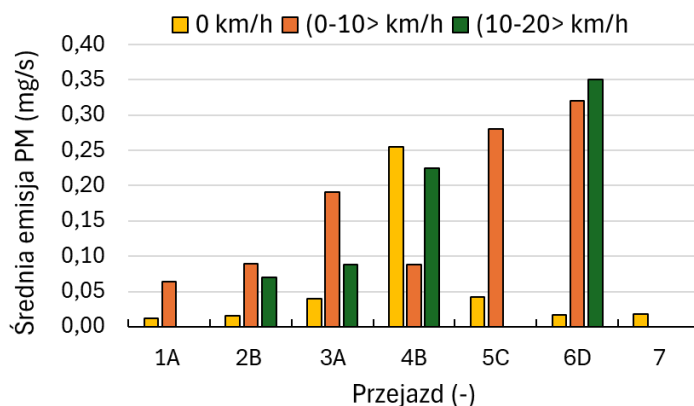
Tab. 7.3. Dane dotyczące przejazdów

| Przejazd | Trasa | Pochylenie podłużne toru | Całkowita długość (m) | Bieg   | Dodatkowe obciążenie | Liczba przejazdów | Oznaczenie przejazdu |
|----------|-------|--------------------------|-----------------------|--------|----------------------|-------------------|----------------------|
| 1        | A     | ↓                        | 824                   | 1      | -                    | 1                 | <b>1A</b>            |
| 2        | B     | ↑                        | 824                   | 1      | -                    | 1                 | <b>2B</b>            |
| 3        | A     | ↓                        | 824                   | 1-3    | -                    | 1                 | <b>3A</b>            |
| 4        | B     | ↑                        | 824                   | 1-3    | -                    | 1                 | <b>4B</b>            |
| 5        | C     | 0                        | 135                   | 1      | wagon                | 4                 | <b>5C</b>            |
| 6        | D     | 0                        | 350                   | 1-3    | -                    | 2                 | <b>6D</b>            |
| 7        | n.d.  | n.d.                     | n.d.                  | jałowy | -                    | -                 | <b>7</b>             |

Przejazdy badawcze zostały zaplanowane, aby jak najbardziej były zbliżone do prac rzeczywistego pojazdu podczas całoninowej eksploatacji. Dla sklasyfikowanych rodzajów prac, które pojazd wykonał podczas pełnej zmiany roboczej, przyporządkowano przejazdy badawcze odpowiadające pod względem obciążenia pojazdu. Prędkości, w jakich poruszał się wózek motorowy podczas poszczególnych przejazdów, zostały również podzielone na zakresy. Działanie to miało na celu późniejsze odwzorowanie trasy przejazdu i prac podczas rzeczywistego dnia eksploatacji pod względem emisji.

Wyniki uzyskane podczas przeprowadzenia badań dla 7 wariantów podzielono ze względu na przedziały prędkości. Wyniki zostały uśrednione w celu analizy emisji sekundowej (Rys. 7.14). Najbardziej emisjogenną grupą okazał się przejazd po płaskim torze bez obciążenia tj. 6D, w zakresie prędkości (10-20) km/h. Średnia wartość emisji wyniosła 0,35 mg/s. Jednakże wybijającą się grupą dla niemal wszystkich przejazdów była prędkość w zakresie (0-10) km/h. Może być to spowodowane większym obciążeniem silnika podczas rozpędzania pojazdu. Średnia emisja PM dla biegu jałowego, tj. dla prędkości 0 km/h, w większości charakteryzowała się najniższą wartością dla danego przejazdu. W przypadku przejazdu 4B zarejestrowana została nietypowa sytuacja, gdzie wartość emisji PM osiągnęła najwyższą wartość dla wszystkich postojów. Przejazd odbywał się pod górę, ze zmianami biegów, z tego powodu można założyć, że powodem mogło być nagrzanie układu

wylotowego i emisja wtórna PM pochodząca z nagaru znajdującego się w układzie wylotowym. Innym wytłumaczeniem może być działanie maszynisty, który pomimo postoju mógł zwiększyć obciążenie silnika w celu napełnienia układu pneumatycznego. Innym czynnikiem mógł być błąd pomiarowy aparatury.



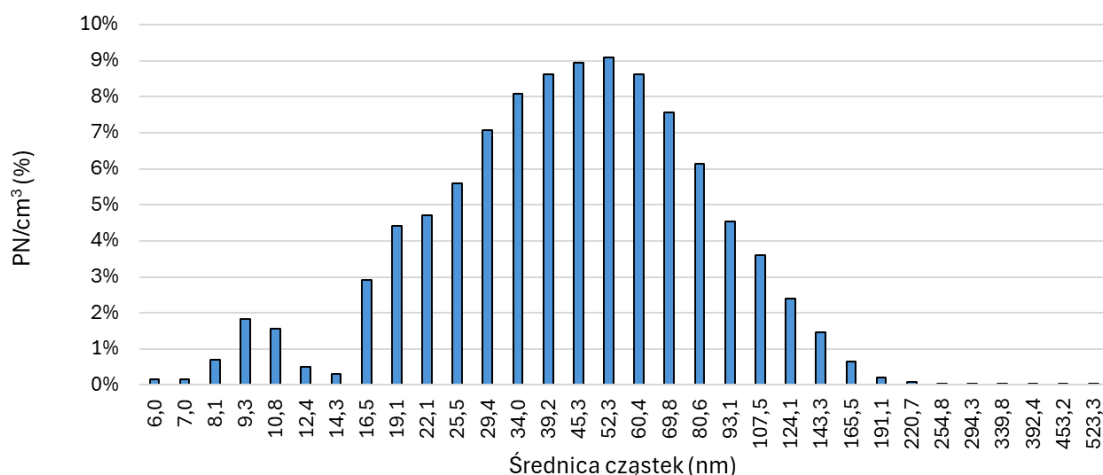
Rys. 7.14. Średnia emisja PM (mg/s) dla poszczególnego przejazdu i zakresu prędkości

Na bazie charakterystyki pracy dla każdego z jej rodzajów podczas rzeczywistej eksploatacji pojazdu odniesione zostały odpowiadające im przejazdy badawcze. Taką metodę zastosowano między innymi dla oszacowania całkowitej emisji spalin lokomotywy na trasie przejazdu po linii kolejowej w Korei Południowej [121]. Dodatkowo, w niniejszej pracy, porównano w jakim stopniu wykonane badania pokrywają się z rzeczywistymi udziałami czasowymi. Ze względu na ograniczoną prędkość przejazdów na bocznicy kolejowej, zakresy pokrywają się dla niższych prędkości. Należy jednak zauważyć, że eksploatacja tego typu pojazdów odbywa się głównie na biegu jałowym lub przy małych prędkościach. Z tego powodu całkowity stopień odwzorowania rzeczywistego przejazdu był możliwy w 71,43%, gdzie postój stanowił 61,7% (Tab. 7.4).

Tab. 7.4. Udziały czasowe dotyczące rzeczywistej eksploatacji pojazdu podczas pełnego dnia pracy z podziałem na rodzaj pracy i zakresy prędkości, zgodne (na zielono) lub niezgodne (na czerwono) z przejazdami podczas badań emisji spalin

| Numer przejazdu            | Rodzaj pracy              | Prędkość (km/h) |        |         |         |         |         |         |         | Suma   |
|----------------------------|---------------------------|-----------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
|                            |                           | 0               | (0-10> | (10-20> | (20-30> | (30-40> | (40-50> | (50-60> | (60-70> |        |
| 7                          | Przygotowanie pojazdu     | 1,26%           | 0,00%  | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%   | 1,26%  |
| 6D                         | Manewrowanie              | 13,54%          | 0,77%  | 0,92%   | 1,15%   | 1,34%   | 0,76%   | 0,08%   | 0,00%   | 18,55% |
| 4B                         | Jazda z pustymi wagonami  | 12,02%          | 1,47%  | 1,63%   | 0,85%   | 2,00%   | 3,87%   | 3,06%   | 0,34%   | 25,24% |
| 5C                         | Jazda z pełnymi wagonami  | 20,73%          | 1,84%  | 3,37%   | 3,34%   | 3,61%   | 2,75%   | 1,74%   | 0,05%   | 37,43% |
| 7                          | Załadunek                 | 6,11%           | 0,00%  | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%   | 6,11%  |
| 1A/2B                      | Praca na torze i żurawiem | 4,62%           | 1,83%  | 0,07%   | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%   | 6,53%  |
| 3A/4B                      | Przerwa w pracy           | 3,41%           | 0,21%  | 0,99%   | 0,27%   | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%   | 4,87%  |
| Ogółem udział zgodności    |                           | 61,70%          | 6,12%  | 3,61%   | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%   | 71,43% |
| Ogółem udział niezgodności |                           | 0,00%           | 0,00%  | 3,37%   | 5,60%   | 6,95%   | 7,38%   | 4,88%   | 0,39%   | 28,57% |

Normy emisji spalin zarówno dla pojazdów NRMM jak i pojazdów drogowych typu PC czy HDV przez wiele lat uwzględniały jedynie emisję masy związków szkodliwych. Jednakże, wraz z wejściem najnowszego poziomu norm emisji spalin dla wymienionych grup pojazdów, konieczny stał się pomiar liczby emitowanych cząstek stałych w procesie dopuszczenia do eksploatacji silnika bądź pojazdu. Ze względu na brak możliwości rejestracji mocy dla badanego pojazdu, a w konsekwencji, odniesieniu wyemitowanych PM i PN do wykonanej pracy, średnie wyniki zmierzone podczas przejazdów badawczych zostały odniesione do rzeczywistego dnia pracy pojazdu WM-15A. Wyniki te są punktem odniesienia do kolejnych etapów. Na rysunku 7.15 przedstawiono udział liczby cząstek stałych dla całego rzeczywistego przejazdu w zależności od średnicy cząstek.



Rys. 7.15. Udział procentowy liczby cząstek stałych pod względem średnicy na  $\text{cm}^3$  odniesiony do rzeczywistego przejazdu

Średnie wartości emisji sekundowej PM uzyskane podczasjazd badawczych zostały odniesione do rzeczywistego dnia pracy pojazdu z uwzględnieniem czasu pracy dla danego zakresu. Odniesienie wyników było możliwe dla 71,43% czasu. Na tej podstawie obliczone zostały wartości masy wyemitowanego PM dla danych zakresów (Tab. 7.5). Wartości emisji dla postoju dla wszystkich przejazdów, zostały uśrednione na podstawie uzyskanych wartości emisji dla prędkości pojazdu 0 km/h. Powodem było ograniczenie wpływu wartości skrajnych i znacznie odbiegających od pozostałych wartości. Opisywane odchylenia mogły mieć znaczny, negatywny wpływ na obliczenia średnich wartości emisji PM dla postojów i mogły znacząco zniekształcić końcowe wyniki oraz płynące z nich wnioski. Rejestracja wartości emisji spalin dla postoju odbywała się podczas względnie krótkich okresów pomiarowych, podczas gdy czas pojedynczych postojów pojazdu, w rzeczywistej eksploatacji, był znacznie dłuższy, czasem trwając nawet kilkadziesiąt minut. Celem zwiększenia liczby punktów pomiarowych dla postojów było zminimalizowanie możliwych wpływów czynników zewnętrznych takich jak np. czynnik ludzki.

Ze względu udziały czasu pracy, największa masa PM (269,3 mg) przypadła dla prędkości 0 km/h. Postój odpowiadał w sumie za 37,5% wyemitowanej masy PM dla rozpatrywanych zakresów. Z kolei najbardziej emisjogennym pod względem PM był zakres prędkości (0-10) km/h jazdy z pełnymi wagonami. Podczas tego zakresu oszacowano, że wyemitowana masa PM osiągnęłaby poziom 123 mg, przy zaledwie 1,84% całkowitego udziału czasu. Najmniejsza masa PM zostałaby wyemitowana podczas prac żurawiem oraz na torze dla zakresu prędkości (10-20) km/h. Dla całej trasy oszacowano, że łączna masa wyemitowanych PM wyniosłaby 718,1 mg.

Tab. 7.5. Wyestymowana masa wyemitowanego PM (mg) dla całego rzeczywistego dnia pracy

| Numer przejazdu | Rodzaj pracy              | Prędkość (km/h) |          |          |         |         |         |         |         | Ogółem   |
|-----------------|---------------------------|-----------------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
|                 |                           | 0               | (0-10>   | (10-20>  | (20-30> | (30-40> | (40-50> | (50-60> | (60-70> |          |
| 7               | Przygotowanie pojazdu     | 5,5036          | 0        | 0        | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 5,5036   |
| 6D              | Manewrowanie              | 59,1319         | 58,5755  | 70,4186  | b.d.    | b.d.    | b.d.    | b.d.    | 0       | 188,1260 |
| 4B              | Jazda z pustymi wagonami  | 52,4581         | 30,8230  | 87,3870  | b.d.    | b.d.    | b.d.    | b.d.    | b.d.    | 170,6681 |
| 5C              | Jazda z pełnymi wagonami  | 90,5080         | 122,9699 | b.d.     | b.d.    | b.d.    | b.d.    | b.d.    | b.d.    | 213,4779 |
| 7               | Załadunek                 | 26,6953         | 0        | 0        | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 26,6953  |
| 1A/2B           | Praca na torze i żurawiem | 20,1860         | 33,4701  | 1,1834   | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 54,8395  |
| 3A/4B           | Przerwa w pracy           | 14,8653         | 6,8164   | 37,0850  | b.d.    | 0       | 0       | 0       | 0       | 58,7666  |
| Ogółem          |                           | 269,3482        | 252,6549 | 196,0741 | 0/ b.d. | 0/ b.d. | 0/ b.d. | 0/ b.d. | 0/ b.d. | 718,0771 |

## 8. Symulacje numeryczne oraz dobór układu oczyszczania spalin

### 8.1. Opis prac

Po przeprowadzeniu badań pomiarów emisji spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji pojazdu następnym etapem prac było wykonanie symulacji numerycznych przepływu spalin przez modele filtrów DPF. Analizy zostały przeprowadzone dla trzech modeli filtrów. Przyjęto trzy warianty warunków pracy, które zostały wybrane z danych uzyskanych podczas badań terenowych. Głównym celem badań symulacyjnych była analiza parametrów pracy w filtrze oraz weryfikacja wyników w aspekcie poprawnego doboru i aplikacji DPF w formie retrofitingu na pojeździe kolejowym. Założeniami było osiągnięcie jak największej sprawności filtracji cząstek stałych oraz jak najmniejszych oporów przepływu – gradientu ciśnienia  $\Delta P$ .

Badania symulacyjne zostały przeprowadzone w programie Ansys 2025 R2, w uniwersalnym oprogramowaniu Fluent do obliczeniowej mechaniki płynów CFD służące do modelowania przepływu płynów, wymiany ciepła i masy, reakcji chemicznych i innych. W celu redukcji emisji cząstek stałych z badanego pojazdu kolejowego starszej generacji zdecydowano się wykorzystać rozwiązanie filtra, którego konstrukcja łączy w sobie rozwiązania filtrów typu wall-flow, w której gazy wylotowe przepływają przez porowate ścianki kanałów filtrujących, oraz flow-through, gdzie przepływ następuje przez otwory wykonane w metalowych warstwach blachy ułożonych warstwowo [35]. W wytypowanym rozwiązaniu konstrukcji DPF przepływ spalin w kanałach kierowany jest poprzez specjalnie ukształtowane otwory w warstwie blach w kierunku warstwy porowatej znajdującej się pomiędzy dwoma warstwami blach. Następnie przepływ spalin powinien przechodzić przez warstwę porowatą, gdzie następowaloby osadzenie się cząstek stałych na ścianach warstwy porowatej, a gazy wylotowe powinny wychodzić przez otwory w drugiej warstwie blachy do sąsiedniego kanału.

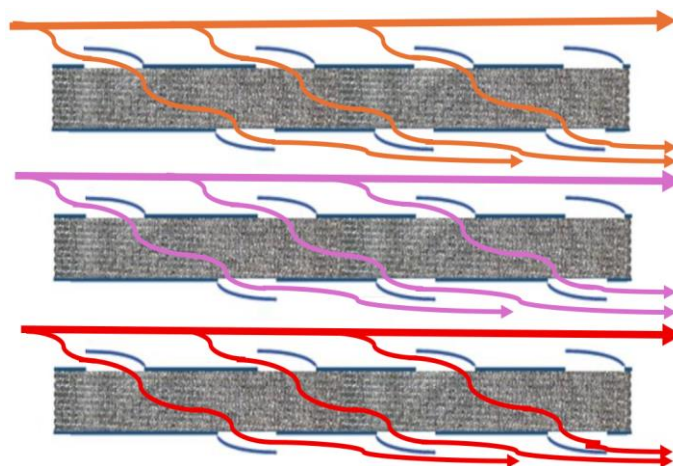
Badania numeryczne były podzielone na kilka etapów. Pierwszym z nich było zamodelowanie w programie do modelowania wirtualnego CAD, o nazwie Solidworks, trzech modeli 3D filtrów o różnych wymiarach, jednak z takimi samymi parametrami geometrycznymi warstw metalowych z wykonanymi otworami nakierowującymi przepływ spalin. Następnie w zaimportowanych do programu Ansys – moduł DesignModeler – modelach w formacie STEP, wykonano przekroje za pomocą płaszczyzn przechodzących przez osie symetrii filtrów. Na przekroju stworzona została płaszczyzna 2D. Na tej płaszczyźnie stworzono geometrie warstw porowatych, a modelom 2D nadano wymagane do symulacji CFD parametry. Następnie w module Meshing wykonano dyskretyzację modeli i stworzono siatki obliczeniowe, tzw. mesh. W module Meshing nadano również odpowiednim krawędziom nazwy, które determinowały w następnym etapie obliczeń ich zadanie. Stworzone w ten sposób mesh'e modeli filtra zostały zaimportowane do modułu Fluent. Do najważniejszych działań w tym module należało nadanie warunków brzegowych dla symulacji, aby móc jak najwierniej odwzorować parametry i samą pracę filtrów. Po przeprowadzonych symulacjach wybrane zostały najistotniejsze wskaźniki, które posłużyły do scharakteryzowania warunków pracy filtra DPF.

### 8.2. Metodyka badań symulacyjnych

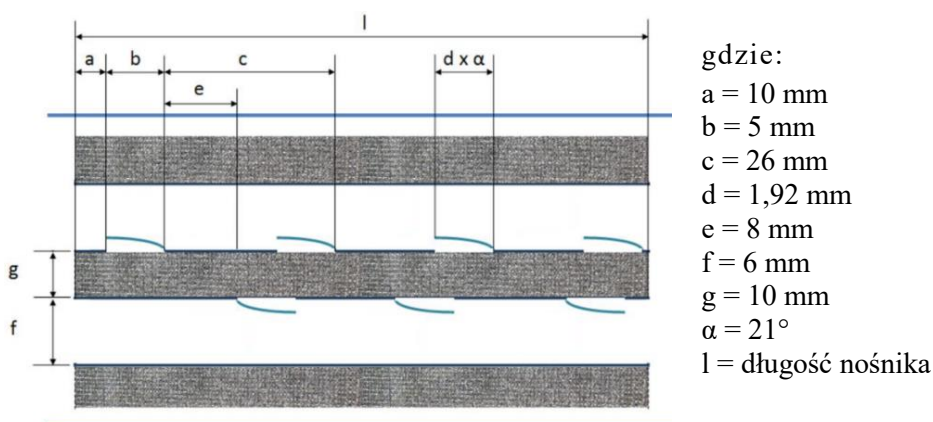
#### Modele filtrów

Wybrane rozwiązanie filtrów DPF do retrofitingu pojazdu szynowego powinno pomóc w redukcji emisji cząstek stałych zawartych w gazach spalinowych. Zamodelowane w formie 2D przekroje filtrów wyróżniają się konstrukcją wewnętrzną, gdzie nośnik filtra składa się z warstwy blach z wyprofilowanymi otworami nakierowującymi przepływ spalin. Blachy te są ułożone naprzemiennie z kanałami przepływowymi oraz warstwami porowatymi. W założeniach symulacji gazy spalinowe poprzez otwór wlotowy filtra trafiają do jego części wewnętrznej – dyfuzora. W tym miejscu prędkość gazów zmniejsza się ze względu na rozszerzającą się geometrię, a ciśnienie spalin rośnie. Następnie gazy spalinowe trafiają na znacznie węższe kanały przepływowe, przez co znacząco przyspieszają. Specjalnie wyprofilowane blaszane łopatki, znajdujące się przy otworach prowadzących do i z fazy porowatej, są rozmieszczone naprzemiennie po obu stronach kanału przepływowego. Pełnią one dwie funkcje. Pierwszą z nich jest „wyłapywanie” przepływu i prowadzenie strugi gazów do wewnątrz fazy porowatej za pomocą łopatek ustawionych w kierunku napływających spalin. Ze względu na występujące w fazie porowatej opory, przepływ spalin zwalnia. Po przejściu spalin przez fazę porowatą, gdzie powinny osadzać się cząstki stałe, trafiają one do otworu wylotowego

prowadzącego do kolejnego kanału przepływowego. Przy otworach wypływowych z fazy porowatej znajdują się łopatki skierowane w kierunku wylotu z kanału przepływowego. Wydostające się do drugiego kanału przepływowego gazy przyspieszają ze względu na wytworzone przez przepływający strumień spalin podciśnienie. Ustawione w kierunku wylotu z kanału przepływowego łopatki pełnią w tym miejscu drugą funkcję. Nakierowują one strumień przepływających spalin na wlot do kolejnego otworu do fazy porowatej. W ten sposób poszczególne strumienie gazów spalinowych mogą przechodzić przez kilka warstw porowatych na całej długości kanałów przepływowych (Rys. 8.1). Wymiary lokalne nośnika filtra, przyjęte na potrzeby symulacji, zostały przedstawione w przekroju na rysunku 8.2.



Rys. 8.1. Schemat graficzny przepływu gazów spalinowych w przekroju poprzecznym przez warstwy porowate (na podstawie [35])



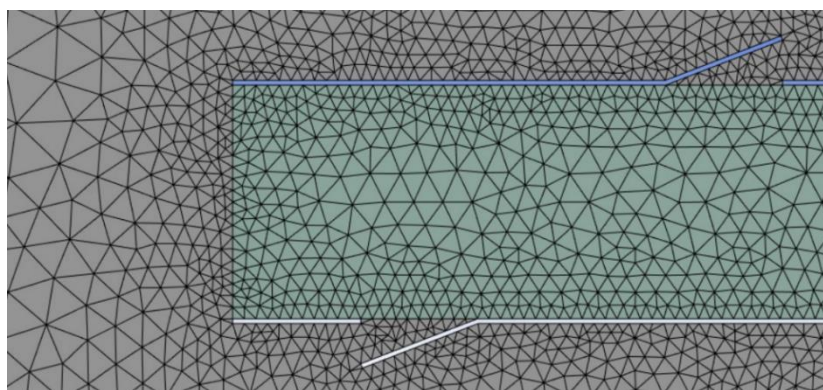
Rys. 8.2. Uproszczony schemat budowy i wymiary filtra w przekroju poprzecznym (na podstawie [35])

Trzy wybrane do symulacji filtry różniły się od siebie rozmiarami geometrycznymi oraz objętością. Model 1 był najmniejszy, jego podstawowe wymiary geometryczne to średnica w najszerszym punkcie 300 mm, długość całkowita 720 mm oraz średnica wlotu 80 mm. Długość nośnika wraz z kanałami przepływowymi wynosiła 303,5 mm, a objętość nośnika 21,5 dm<sup>3</sup>. Średnica modelu była o 20 mm większa od najmniejszego filtra. Długość nośnika wynosiła 340 mm, a całkowita 800 mm. Objętość nośnika była o 27% większa względem najmniejszego modelu. Największym spośród badanych filtrów był model 3, którego objętość nośnika wynosiła 46,7 dm<sup>3</sup> i wynikała ze średnicy 400 mm oraz długości nośnika 371,5 mm. Długość całkowita wynosiła 870 mm. Model 3 miał również najszerszy wlot i wylot, gdzie średnica wynosiła 100 mm (Tab. 8.1). Rozmiary filtrów zostały uzgodnione i przyjęte na bazie współpracy Politechniki Poznańskiej z przedsiębiorstwem zajmującym się wytwarzaniem filtrów cząstek stałych, w tym do zastosowania w maszynach typu Non-Road.

Tab. 8.1. Dane dotyczące wykorzystanych w symulacjach modeli filtrów

| Parametr          | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Jednostka       |
|-------------------|---------|---------|---------|-----------------|
| Średnica          | 300     | 320     | 400     | mm              |
| Długość całkowita | 720     | 800     | 870     | mm              |
| Średnica wlotu    | 80      | 80      | 100     | mm              |
| Długość nośnika   | 303,5   | 340     | 371,5   | mm              |
| Objętość nośnika  | 21,5    | 27,3    | 46,7    | dm <sup>3</sup> |

W celu wykonania obliczeń numerycznych niezbędne było wykonanie siatek obliczeniowych modeli filtrów, tzw. „mesh”. Siatki, na bazie modeli 2D przekrojów, wykonano w module Meshing programu Ansys metodą „triangles method”. Metoda ta jest jedną z najczęściej stosowanych technik tworzenia siatki obliczeniowej w analizie numerycznej. Polega na podziale obszaru analizy na małe trójkątne elementy skończone, które razem tworzą siatkę trójkątną (triangular mesh). Każdy stworzony trójkątny obszar odpowiada lokalnemu fragmentowi, który podlega analizie. Dla każdego obszaru są prowadzone lokalne obliczenia bazujące na danych wejściowych, pochodzące z sąsiadujących obszarów, tj. trójkątów. Zaletą tej metody jest bardzo duża elastyczność dopasowania się do nieregularnych kształtów. W przypadku modeli o złożonej geometrii metoda ta jest korzystniejsza dla automatyzacji generowania siatki, względem np. siatki „kwadratowej” (quadrilateral). Rozmiar siatek ustalono na 2 mm, jednak w celu uzyskania dokładniejszych wyników obliczeń i uwzględnienia zjawisk występujących w okolicach powierzchni, dla każdej z krawędzi w modelu stworzono drobniejszą siatkę za pomocą funkcji „Mesh sizing”. Funkcja ta pozwala na kontrolowanie wielkości elementów siatki w wybranych częściach geometrii. W ten sposób w obszarach przypowierzchniowych zagęszczono siatkę, a parametr rozmiaru siatki w tych obszarach został ustalony na 0,5 mm. Umożliwiło to powstanie spójnych siatek na połączeniach powierzchni faz porowatej z przestrzeniami przepływowymi w filtrach (Rys. 8.3). Najważniejsze parametry stworzonych siatek trzech modeli filtrów zostały przedstawione w tabeli 8.2.



Rys. 8.3. Widok wygenerowanej trójkątnej siatki obliczeniowej na styku fazy porowatej oraz obszaru przepływowego filtra, widoczne zagęszczenie siatki w obszarach krawędzi elementów

Tab. 8.2. Dane dotyczące siatki obliczeniowej (mesh) modeli filtrów

| Parametr           | Model 1                 | Model 2                 | Model 3                 |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Liczba węzłów      | 131 139                 | 157 367                 | 209 966                 |
| Liczba elementów   | 236 836                 | 284 204                 | 379 885                 |
| Jakość elementów   | 0,95432                 | 0,95023                 | 0,94973                 |
| Jakość ortogonalna | 0,95773                 | 0,95382                 | 0,95345                 |
| Średnia skośność   | $6,8796 \times 10^{-2}$ | $7,5249 \times 10^{-2}$ | $7,5797 \times 10^{-2}$ |

### Punkty pracy oraz dane wejściowe

Przeprowadzenie symulacji numerycznych zaplanowano do zrealizowania dla trzech punktów pracy. Pierwszym punktem pracy był bieg jałowy, który na podstawie badań terenowych udziałów czasu pracy pojazdu WM-15A stanowił 61,7% całkowitego czasu pracy podczas zmiany roboczej. Natężenie przepływu masy spalin dla tego punktu jest najmniejsze i na podstawie parametrów zmierzonych podczas badań pomiarów emisji wynosiło 242 kg/h. Drugim wybranym punktem był skrajny punkt pracy pod względem natężenia przepływu masy spalin zarejestrowany podczas badań. Wartość przepływu w tym punkcie wyniosła 673 kg/h i została zarejestrowana podczas rozpędzania pojazdu na torze płaskim do maksymalnej dopuszczalnej prędkości na torze. Ostatnim z wytypowanych punktów było średnie natężenie przepływu spalin na poziomie 432 kg/h. Z wytypowanych punktów pracy dobrano wartości pozostałych parametrów takie jak temperatura gazów wylotowych, gęstość oraz stężenie PM. Dla punktu maksymalnego zarejestrowane stężenie PM wyniosło 8,19 mg/m<sup>3</sup>, co jest wartością od kilkunastu do kilkudziesięciu razy większą względem stężeń w pozostałych punktach pracy (Tab. 8.3).

Tab. 8.3. Dane dla wybranych punktów pracy zmierzone podczas badań terenowych

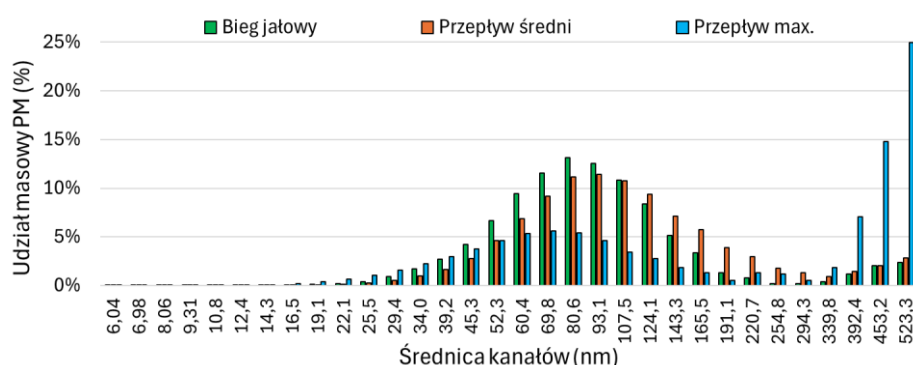
| Parametr                        | Bieg jałowy | Przepływ średni | Przepływ max. | Jednostka         |
|---------------------------------|-------------|-----------------|---------------|-------------------|
| Natężenie masy przepływu spalin | 242         | 432             | 673           | kg/h              |
| Temperatura spalin              | 364         | 419             | 417           | K                 |
| Gęstość spalin                  | 0,973       | 0,840           | 0,856         | kg/m <sup>3</sup> |
| Stężenie PM                     | 0,27        | 0,60            | 8,19          | mg/m <sup>3</sup> |

W celu dokładnego odwzorowania charakteru przepływu w symulacjach numerycznych wykorzystano funkcję „Species Transport” w module Ansys Fluent. Jest to rozbudowany model pozwalający na realistyczne odwzorowanie przepływów wieloskładnikowych, który bazuje na równaniu transportu składników. Jako medium przyjęto mieszaninę różnych składników znajdujących się w gazach wylotowych. Składnikami gazowymi uwzględnionymi w symulacji są produkty spalania, czyli woda w formie pary wodnej, dwutlenek węgla, a także związki toksyczne spalin takie jak tlenek węgla, tlenki azotu i węglowodory, w symulacji w formie heksanu. Pozostałymi substancjami, które znajdują się w spalinach jest tlen, a także mający największy udział azot. W celu uwzględnienia cząstek stałych w symulacji konieczne również było podanie wartości emisji sekundowej PM. Zmierzone w badaniach wartości składników gazowych, dla odpowiadających punktów pracy, zostały wprowadzone do programu symulacyjnego, jako udział objętościowy, a dla cząstek stałych jako emisja (Tab. 8.4).

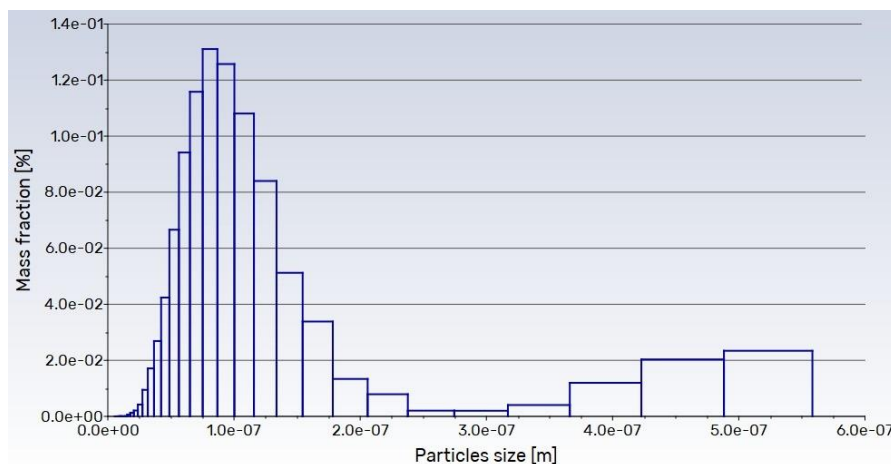
Tab. 8.4. Skład spalin w zależności od punktu pracy

| Składnik spalin | Wzór / Oznaczenie              | Bieg jałowy | Przepływ średni | Przepływ max. | Jednostka                     |
|-----------------|--------------------------------|-------------|-----------------|---------------|-------------------------------|
| Tlenek węgla    | CO                             | 0,0013      | 0,0009          | 0,0009        | Udział<br>Objętościowy<br>(-) |
| Dwutlenek węgla | CO <sub>2</sub>                | 0,0147      | 0,0329          | 0,0635        |                               |
| Heksan          | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> | 0,000246    | 0,000278        | 0,000129      |                               |
| Para wodna      | H <sub>2</sub> O               | 0,12177     | 0,13100         | 0,08651       |                               |
| Azot            | N <sub>2</sub>                 | 0,7829      | 0,6687          | 0,7200        |                               |
| Tlenek azotu    | NO                             | 0,000112    | 0,000672        | 0,001182      |                               |
| Dwutlenek azotu | NO <sub>2</sub>                | 0,000011    | 0,000067        | 0,000118      |                               |
| Tlen            | O <sub>2</sub>                 | 0,1886      | 0,1655          | 0,1276        |                               |
| Cząstki stałe   | PM                             | 1,83544E-08 | 8,2965E-08      | 1,71236E-06   | kg/s                          |

Do dokładnego śledzenia ruchu oraz zamodelowania procesu wprowadzania do obszaru obliczeniowego cząstek stałych wykorzystano funkcję „Discrete Phase Model” (DPM). Model ten służy do symulacji przepływów dwufazowych typu Euler–Lagrange, gdzie występuje faza ciągła tj. płyn oraz faza rozproszona np. PM. Dla fazy rozproszonej śledzenie elementów jest indywidualne dla każdej cząstki lub pakietu (grupy cząstek). W programie Ansys można przyjąć dostępne modele rozkładu cząstek stałych, jednak na potrzeby jak najbardziej rzeczywistego odwzorowania procesów przyjęto dane zarejestrowane za pomocą aparatury PEMS dla wybranych punktów pracy. Stworzono rozkład udziałów masowych PM dla średnic cząstek (Rys. 8.4). Następnie stworzono tabele z rozkładami, którą w formie pliku tekstowego zaimportowano do modułu DPM. Na podstawie wprowadzonych danych program utworzył schemat rozmiarowy cząstek (Rys. 8.5). Charakterystyka dotycząca wielkości, masy oraz natężenia przepływu fazy rozproszonej została ustalona jako równomierny wtrysk powierzchniowy dla obszaru wlotu do przestrzeni obliczeniowej zamodelowanych filtrów.



Rys. 8.4. Procentowy rozkład cząstek stałych pod względem ich średnicy na wlocie do filtra



Rys. 8.5. Rozkład wielkości oraz udział masowy cząstek stałych wygenerowany w module DPM na przykładzie punktu pracy na biegu jałowym

Ze względu na wiele geometrii o niekonwencjonalnych kształtach w modelach filtrów zastosowano model turbulencji k-epsilon. Model ten jest jednym z najbardziej popularnych oraz najczęściej wykorzystywanych rozwiązań do symulacji przepływu płynów i oblicza lepkość turbulentną. W przyjętym do obliczeń modelu wykorzystuje się dwa dodatkowe równania transportu, za pomocą których można opisać zachodzące w przepływie turbulencje. Pierwsze równanie dotyczy energii kinetycznej turbulencji ( $k$ ), a dokładniej bilansu wytworzonej i dyssypowanej energii turbulencji. Z kolei drugie równanie obejmuje szybkość dyssypacji energii turbulencji ( $\epsilon$ ). Lepkość turbulentną można opisać uproszczonym wzorem 8.1.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8.1)$$

gdzie:  $\mu_t$  – lepkość turbulentna,  $\rho$  – gęstość płynu,  $C_\mu$  – stała,  $k$  – energia kinetyczna turbulencji,  $\epsilon$  – szybkości dyssypacji energii turbulencji

## Warstwa porowata

W celu przeprowadzenia symulacji numerycznych jak najbardziej zbliżonych do warunków rzeczywistych, jedną z kluczowych kwestii było nadanie odpowiednich wartości parametrom charakteryzujących warstwę porowatą oraz zachodzących przez nią przepływom. W przypadku przepływów przez ośrodki porowate, ośrodki te modelowane są z wykorzystaniem ich przepuszczalności oraz bezwładnościowego współczynnika strat. Jedną z technik wyprowadzenia odpowiednich stałych jest użycie równania Erguna (8.2) [132,133].

$$\frac{|\Delta p|}{L} = \frac{150\mu}{D_p^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \vartheta_\infty + \frac{1,75\rho}{D_p} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \vartheta_\infty^2 \quad (8.2)$$

gdzie:  $\mu$  – lepkość,  $D_p$  – średnia średnica cząstek,  $L$  – głębokość złoża,  $\varepsilon$  – porowatość,  $\vartheta$  – prędkość,  $\Delta p$  – spadek ciśnienia

Na potrzeby obliczeń symulacyjnych przyjęta została stałość oporu na całej długości warstwy porowatej. Założenie to oblicza skok ciśnienia występujący w warstwie. Na podstawie wzoru (8.2) oraz przyjętych do obliczeń stałych (Tab. 8.5), obliczone zostały współczynniki dla modelowanej warstwy porowatej. Dokładniej były to współczynnik oporu lepkiego ( $R_v$ ) oraz współczynnik oporu wewnętrznego ( $R_i$ ). Na podstawie natężenia masy przepływu zmierzonego podczas badań terenowych przez przepływomierz dla konkretnych punktów obliczono prędkość przepływu płynu. Podzielono strumień masy przepływających spalin przez powierzchnię przekroju przepływomierza. Następnie, znając średnice wlotowe poszczególnych filtrów przeprowadzono te same obliczenia. Ciśnienie otoczenia zostało przyjęte jako 1000 hPa. W celu nadania niezbędnych wartości na wlocie filtra konieczne było obliczenie ciśnienia dla tego obszaru. Znając przyjętą wartość ciśnienia otoczenia, tj. na wylocie, określenie wartości ciśnienia na wlocie było możliwe poprzez obliczenie różnicy ciśnień pomiędzy wlotem a wylotem. Płyn, przepływając przez warstwę porowatą, generuje opór. Wartość oporu jest zależna od parametrów płynu oraz warstwy porowatej. Do obliczenia tej wartości niezbędne są dane dotyczące porowatości, udziału płynu, grubości warstwy, sferyczności, lepkości dynamicznej, a także gęstości płynu. Na potrzeby symulacyjne przyjęto odpowiednie wartości z punktów pracy, geometrii filtrów, a także je obliczono. Dane dotyczące warstwy porowatej przedstawiono w tabeli 8.5, a prędkości przepływających spalin w tabeli 8.6.

Tab. 8.5. Wybrane parametry warstwy porowatej

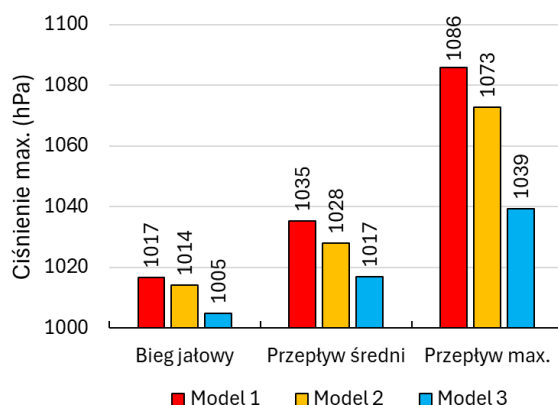
| Parametr                                  | Wartość               | Jednostka        |
|-------------------------------------------|-----------------------|------------------|
| Współczynnik oporu lepkiego ( $R_v$ )     | $4,69 \times 10^{-5}$ | l/m <sup>2</sup> |
| Współczynnik oporu wewnętrznego ( $R_i$ ) | $1,75 \times 10^4$    | l/m              |
| Lepkość dynamiczna                        | $2,07 \times 10^{-5}$ | kg/m/s           |
| Porowatość                                | 0,5                   | -                |
| Średnia średnica porowatości              | 1                     | mm               |
| Grubość warstwy porowatej                 | 10                    | mm               |

Tab. 8.6. Prędkość przepływających spalin

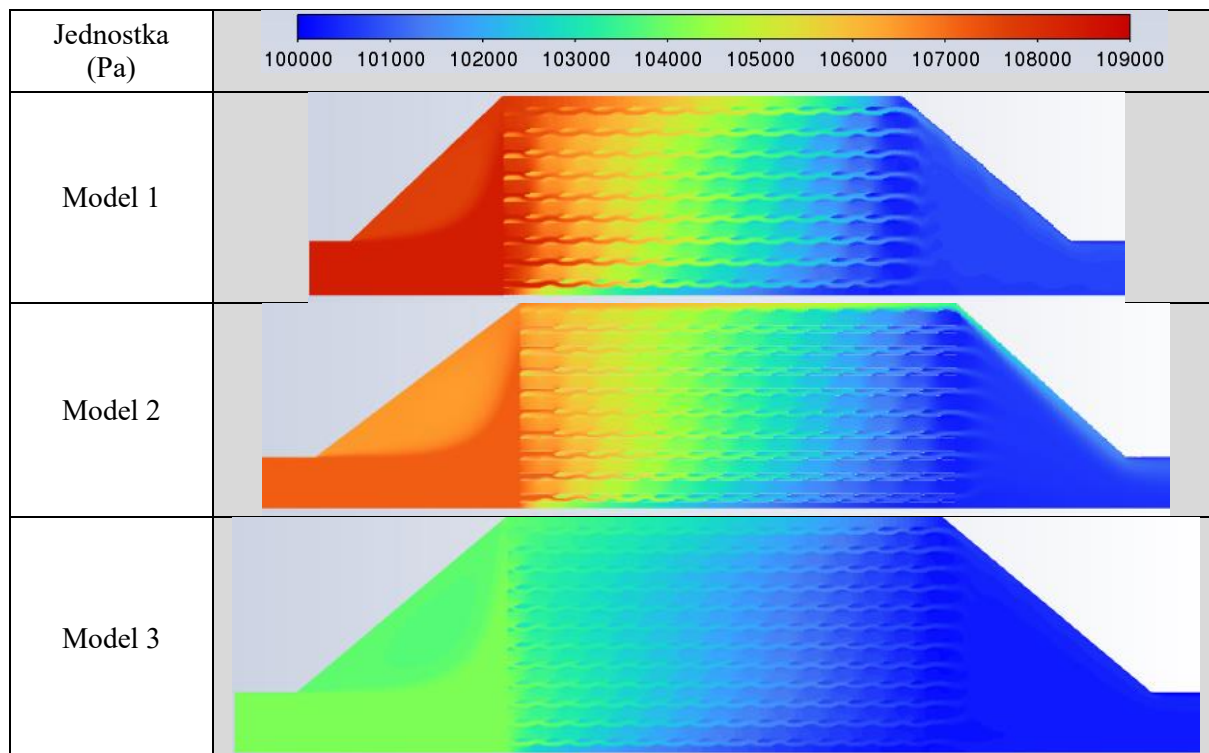
| Punkty pracy                           | Model 1                | Model 2                | Model 3                |
|----------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                                        | Średnica wlotu 80 mm   |                        | Średnica wlotu 100 mm  |
| Bieg jałowy                            | 17,5 m/s               |                        | 8,8 m/s                |
| Przepływ średni                        | 27,3 m/s               |                        | 17,5 m/s               |
| Przepływ max.                          | 27,7 m/s               |                        | 43,2 m/s               |
| Prędkość napływu na kanały przepływowe | Średnica filtra 300 mm | Średnica filtra 320 mm | Średnica filtra 400 mm |
| Bieg jałowy                            | 1,1 m/s                | 0,92 m/s               | 0,55 m/s               |
| Przepływ średni                        | 1,94 m/s               | 1,77 m/s               | 1,09 m/s               |
| Przepływ max.                          | 3,07 m/s               | 2,73 m/s               | 1,73 m/s               |

### 8.3. Obliczenia numeryczne

Każdy z modeli został przebadany dla trzech różnych punktów pracy. Wyniki dla wybranych, charakterystycznych parametrów pracy filtrów zostały przedstawione w formie wykresów oraz rysunków. Maksymalne zarejestrowane ciśnienie w analizowanym obszarze zostało przedstawione na rysunku 8.6. Największe wartości dotyczyły Modelu 1. Powodem była najmniejsza powierzchnia przepływu. Dla punktów pracy na biegu jałowym oraz przy przepływie średnim, wartości ciśnienia osiągnęły poziom odpowiednio 1017 hPa oraz 1035 hPa. Podczas pracy przy maksymalnym przepływie wartość ciśnienia osiągnęła poziom 1086 hPa. Najmniejsze wartości ciśnienia maksymalnego odnotowano dla Modelu 3, gdzie większa powierzchnia wpływa na zmniejszenie oporu przepływu spalin. Przy największym przepływie, maksymalne ciśnienie w Modelu 3 wyniosło 1039 hPa i było o 4 hPa wyższe od wartości osiągniętej w Modelu 2 dla przepływu średniego. Ciśnienie w Modelu 2 dla pracy na biegu jałowym, przy przepływie średnim oraz przepływie maksymalnym wyniosło kolejno 1014 hPa, 1028 hPa oraz 1073 hPa. Na rysunku 8.7 został przedstawiony przykład rozkładu ciśnienia w modelach filtrów podczas pracy przy przepływie maksymalnym. Różnice w wartościach ciśnienia pomiędzy modelami wynikają z rozmiarów filtrów. Widoczny jest również wpływ zastosowanych łopatek na przepływ spalin w kierunku zewnętrznych obszarów filtrów.

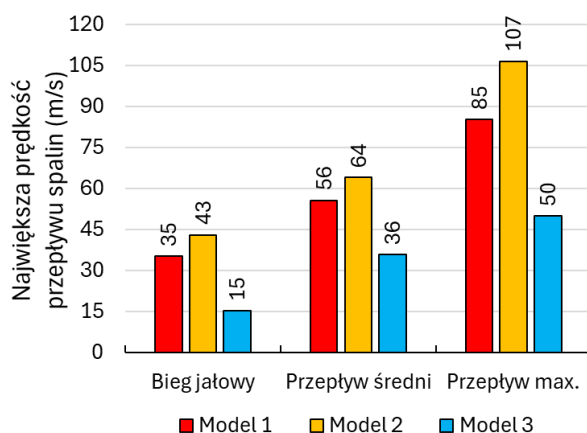


Rys. 8.6. Ciśnienie maksymalne w modelach filtrów w zależności od punktu pracy

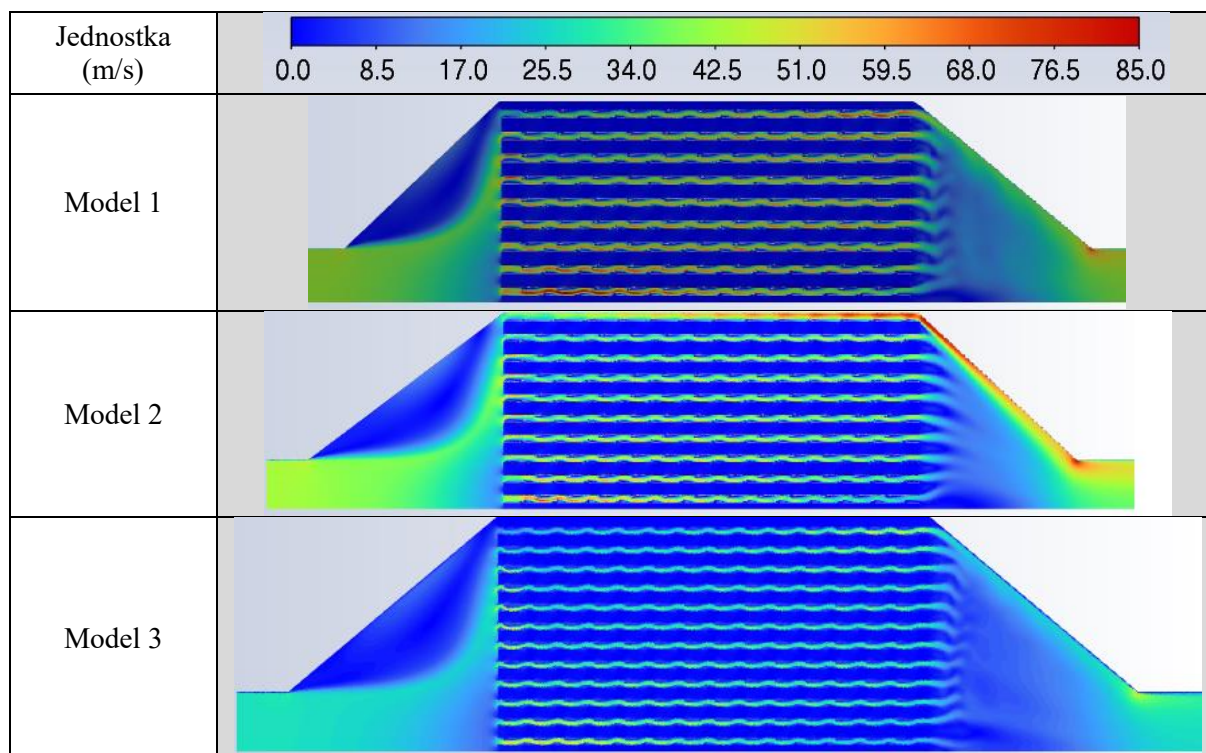


Rys. 8.7. Rozkład ciśnienia w filtrach podczas pracy przy maksymalnym masowym natężeniu przepływu spalin 673 kg/h – wlot spalin od lewej strony

W przypadku maksymalnej zarejestrowanej prędkości przepływu spalin (Rys. 8.8) największa wartość została osiągnięta w Modelu 2. Dotyczyło to wszystkich punktów pracy. Miejscem występowania zwiększonej prędkości były okolice wylotu z wąskiego kanału przepływowego graniczącego z warstwą zewnętrzną filtra (Rys. 8.9). Kanał ten powstał w wyniku założeń dotyczących rozmiarów nośnika filtra. Zwężenie przepływu w tym miejscu, wynikające z geometrii filtra, powoduje wzrost prędkości spalin. Dla wszystkich modeli prędkość przepływu spalin w warstwie przyściennej konfuzora jest zwiększona. Poza opisanymi wyjątkami, jednym z miejsc występowania największych prędkości przepływu spalin jest obszar wlotu do kanałów przepływowych znajdujących się w pobliżu osi symetrii filtra (Rys. 8.10). Wpływające do dyfuzora gazy spalinowe trafiają na centralną część wlotu do nośnika. Ze względu na napór napływających gazów, w tym obszarze zwiększa się prędkość spalin wpływających do wąskich kanałów przepływowych. Drugim miejscem występowania znacznych prędkości jest okolica wylotu z kanałów znajdujących się najdalej od osi symetrii filtra. Wynika to ze zwiększonego natężenia przepływu spalin, które przepływając przez warstwy porowate kierują się w stronę kanałów zewnętrznych.

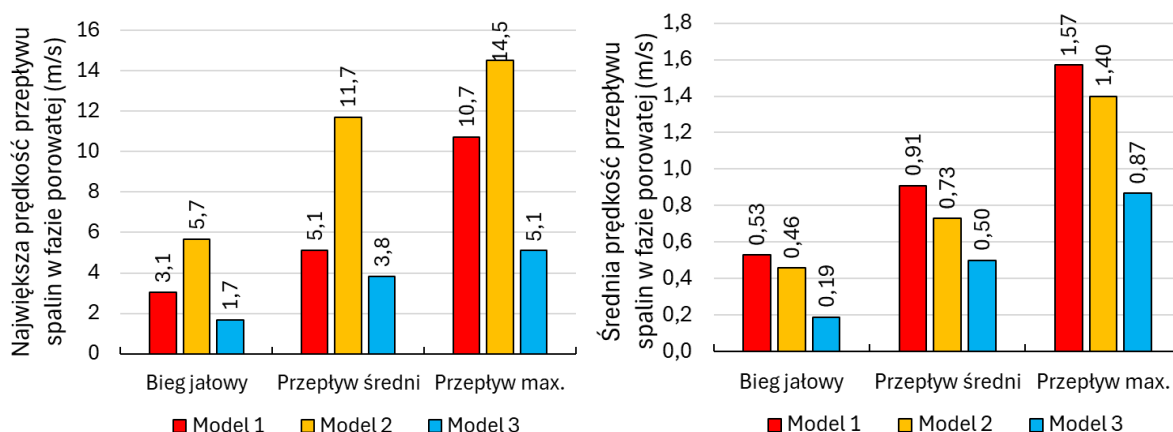


Rys. 8.8. Prędkość maksymalna gazów spalinowych w przestrzeni przepływowej w zależności od punktu pracy

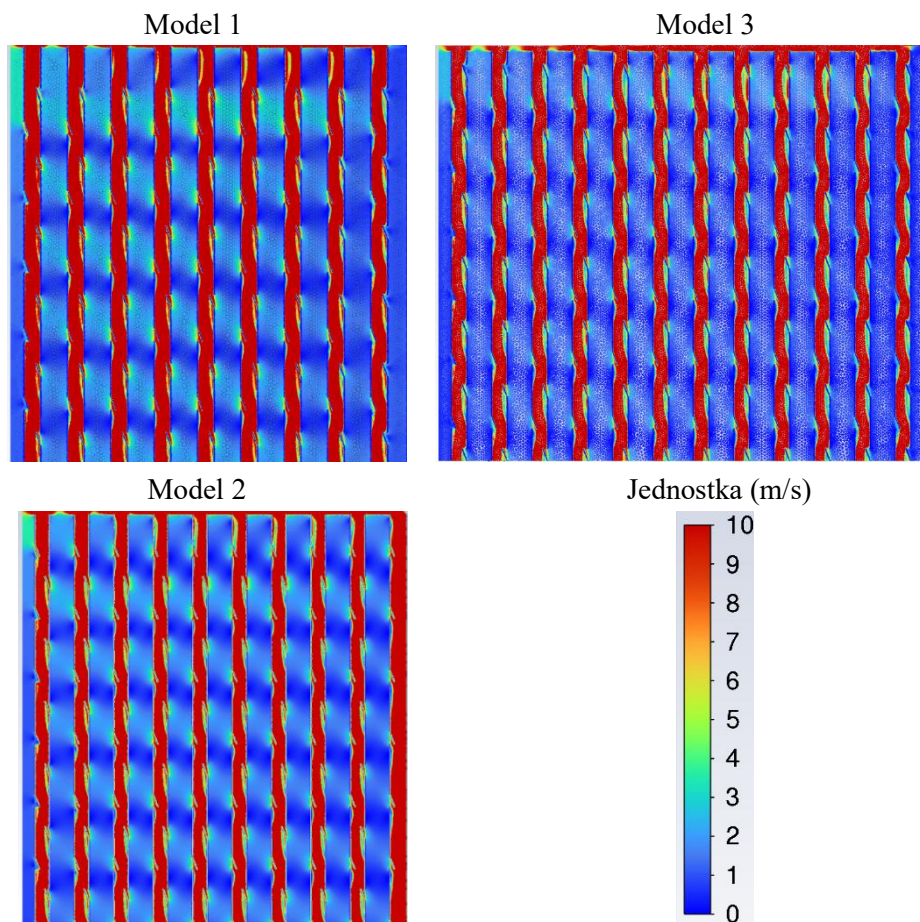


Rys. 8.9. Rozkład prędkości w filtrach podczas pracy przy maksymalnym natężeniu przepływu spalin – wlot spalin od lewej strony

Dla maksymalnej prędkości przepływu spalin przez warstwę porowatą (Rys. 8.10a) największe wartości również zostały zarejestrowane w przypadku Modelu 2. W przypadku pracy na biegu jałowym, przepływie średnim oraz przepływie maksymalnym osiągnęły prędkość kolejno 5,7 m/s, 11,7 m/s oraz 14,5 m/s. Rozpatrując średnią prędkość w fazie porowatej (Rys. 8.10b) widoczny jest wzrost opisywanego parametru wraz z wzrostem masowego natężenia przepływu. Średnia prędkość przepływu zależy również od wielkości filtra. Im filtr większy, tym średnia prędkość jest mniejsza. Na rysunku 8.11 przedstawiono przykład przepływu spalin przez warstwę porowatą dla maksymalnego masowego natężenia przepływu.



Rys. 8.10. Prędkość przepływu gazów spalinowych w zależności od punktu pracy:  
a) w przestrzeni przepływowej, b) w przestrzeni porowatej



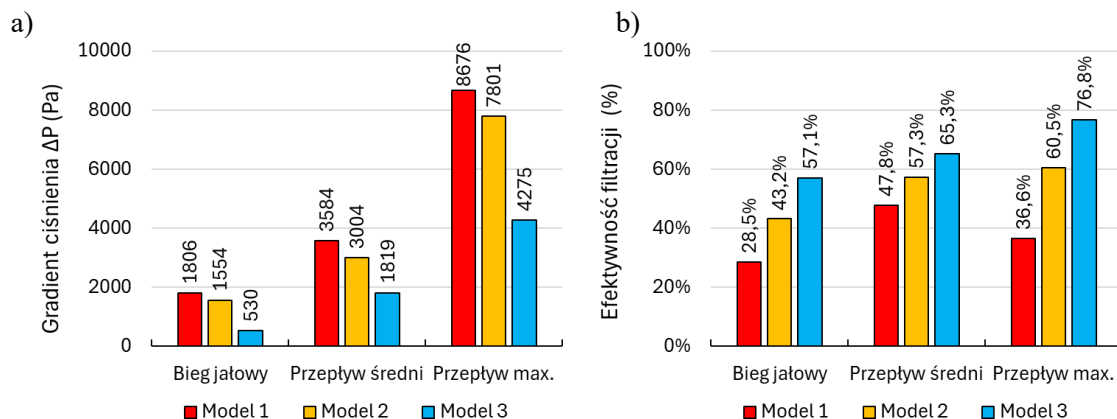
Rys. 8.11. Prędkość przepływu w fazie porowatej podczas pracy przy maksymalnym natężeniu przepływu spalin – widok od strony wlotu

Straty ciśnienia w filtrze cząstek stałych są jednym z podstawowych parametrów rozpatrywanych podczas jego doboru. Maksymalną wartością alarmową gradientu ciśnienia w DPF podawaną w literaturze jest 20 000 Pa [30]. Narastające ciśnienie w filtrze powoduje zwiększone zużycie paliwa. W przypadku analizowanych modeli w żadnym z nich nie została osiągnięta taka wartość. Największy zarejestrowany gradient ciśnienia podczas badań wyniósł 8676 Pa dla maksymalnego przepływu w przypadku Modelu 1. Dla tych samych warunków pracy Model 2 osiągnął 7801 Pa, a Model 3 4275 Pa (Rys. 8.12a). Wartości te są dalekie od poziomu dopuszczalnego. Znaczny udział czasu pracy pojazdów szynowych na biegu jałowym oraz korzystny gradient ciśnienia osiągnięty podczas symulacji pozwalają sądzić, że korzystnym rozwiązaniem mógłby być dobór filtra o mniejszej objętości nośnika. Byłoby to zasadne pod względem finansowym, a także umożliwiłoby łatwiejszy montaż filtra na pojeździe ze względu na jego bardziej kompaktowe rozmiary.

Dla nowych kolejowych silników spalinowych, ze względu na ograniczenie zajmowanej przestrzeni w pojeździe, zaczęto stosować filtry, których stosunek objętości nośnika DPF do objętości skokowej silnika ( $V_{DPF}/V_{SS}$ ) jest równy 2 [134]. Dla silników pojazdów samochodowych stosunek ten jest jeszcze mniejszy. W przypadku Modelu 1 oraz Modelu 2 stosunek  $V_{DPF}/V_{SS}$  w analizowanym przypadku wynosi kolejno 2 oraz 2,5. Z kolei dla Modelu 3  $V_{DPF}/V_{SS} = 4,2$ . Zastosowanie Modelu 3 do retrofitingu wiązałoby się z większym kosztem oraz potrzebną większą przestrzenią do zabudowy na pojeździe, co w przypadku pojazdów kolejowych może być problemem.

Rozpatrując drugi wskaźnik, jakim jest skuteczność filtracji, spośród wszystkich symulacji z największą sprawnością pracował Model 3. Efektywność filtracji wyniosła 57,1%, 65,3% oraz 76,8% dla punktów pracy kolejno na biegu jałowym, średnim przepływie oraz maksymalnym przepływie spalin (Rys. 8.12b). W przypadku Modelu 2 efektywność filtracji, w zależności od punktu pracy, była mniejsza o około 8 – 16,8 pp., względem Modelu 3. Z kolei Model 1 był w stanie zredukować cząstki stałe na poziomie 28,5% – 47,8%. Dobór Modelu 2 do retrofitingu pojazdu kolejowego mógłby być zatem rozwiązaniem uzasadnionym kosztowo, przy nieco mniej korzystnej efektywności filtracji PM. Dodatkowo, wymagana przestrzeń na jego montaż byłaby mniejsza, co wiązałoby się z łatwiejszą aplikacją na pojeździe.

Należy jednak zauważyć, że wykonane pomiary mogły być zrealizowane jedynie w ograniczonym stopniu. Wskaźniki dla pracy z maksymalnym przepływem zostały zmierzone podczas badań na bocznicie kolejowej, gdzie pojazd nie mógł pracować z prędkościami zmierzonymi podczas pełnej zmiany roboczej w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Oznacza to, że obciążenie silnika oraz natężenie masowe przepływu spalin przy większych prędkościach może być większe. Dodatkowo, proces odkładania się cząstek stałych w filtrze jest długotrwały i bez przeprowadzenia eksploatacji obserwowanej niemożliwe jest określenie szybkości przyrostu gradientu ciśnienia. Jednakże w przypadku większych objętości nośnika proces ten trwa dłużej. Dobór filtra DPF jest mocno indywidualnym działaniem ze względu na wiele czynników lokalnych. W niniejszej pracy zdecydowano się dobrać Model 3 do retrofitingu pojazdu szynowego, pomimo że jest to rozwiązanie droższe. Czynniki, które miały wpływ na wybór były: możliwość montażu na pojeździe, korzystne parametry pracy oraz możliwość dłuższej pracy do osiągnięcia dopuszczalnego gradientu ciśnienia.



Rys. 8.12. Wyniki symulacji dla trzech rozpatrywanych modeli filtrów oraz punktów pracy: a) gradient ciśnienia, b) efektywność filtracji

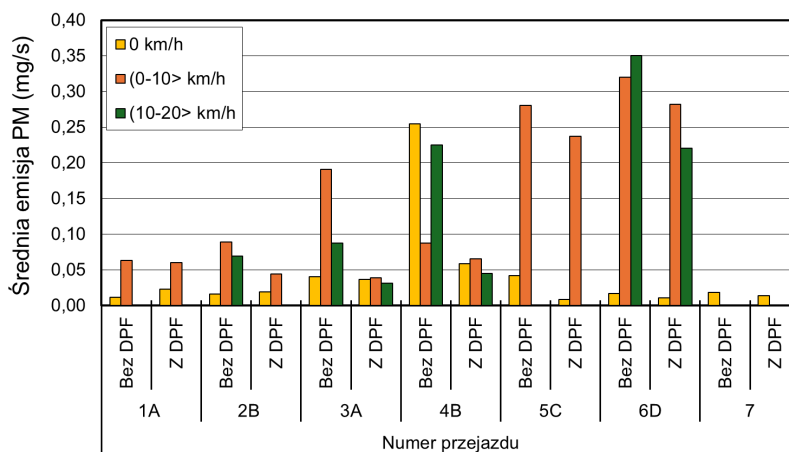
## 9. Badania weryfikacyjne

W celu rzeczywistej weryfikacji sprawności działania wytypowanego układu oczyszczania spalin, zostały przeprowadzone badania pomiarów emisji spalin z wykorzystaniem aparatury PEMS. Pojazd WM-15A został uzbrojony w DPF zamontowany bezpośrednio na układzie wylotowym spalin (Rys. 9.1). Badania zostały przeprowadzone na bocznicy kolejowej Ł-PIT w taki sam sposób jak w Rozdziale 6.4.1. tj. zrealizowano w sumie 10 przejazdów, w 6 konfiguracjach. Dodatkowo, uwzględniono również pracę silnika na postoju. Korzystnym czynnikiem, w aspekcie analizy pomiarów spalin, były warunki atmosferyczne, które były bardzo zbliżone do tych z pierwszego etapu badań.

Średnie wartości emisji uzyskane podczas badań z zamontowanym DPF zostały zestawione z wynikami z pierwszego etapu badań, tj. bez DPF (Rys. 9.2). Niemal we wszystkich przejazdach i zakresach prędkości, względna różnica emisji spalin była korzystna pod względem redukcji emisji PM po zamontowaniu DPF (Tab. 9.1). Zaobserwowana redukcja emisji PM zawiera się od kilku procent, tj. 5,8% dla 1A (0-10) km/h, do prawie 80% dla 3A (0-10) km/h, 5C na postoju oraz 4B (10-20) km/h.



Rys. 9.1. Wytypowany filtr DPF zamontowany na układzie wylotowym pojazdu WM-15A

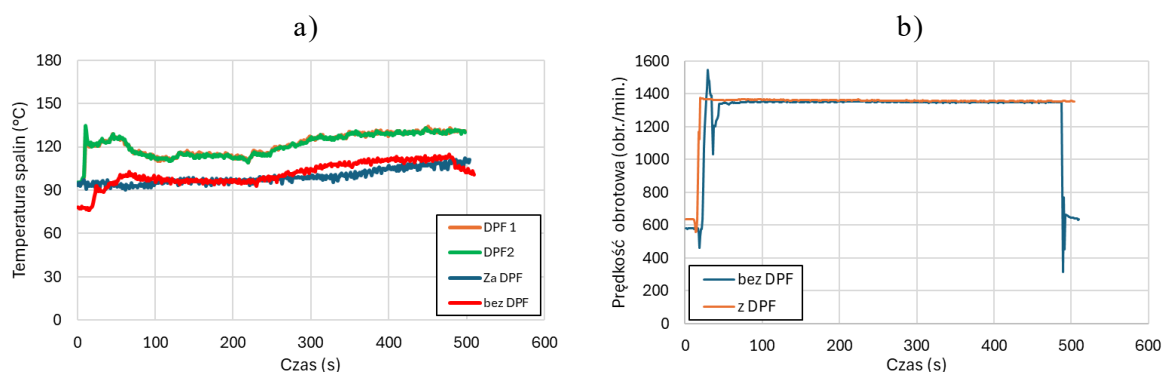


Rys. 9.2. Średnia emisja PM (mg/s) dla danych przejazdów badawczych bez i z DPF

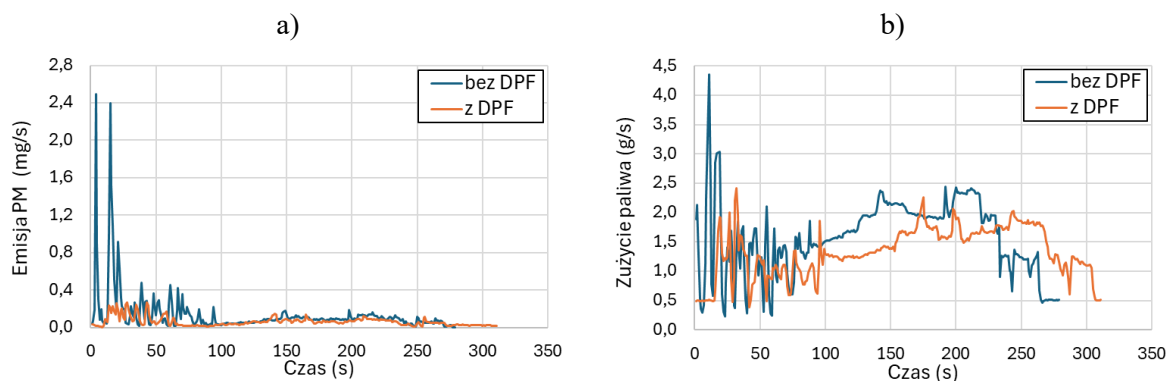
Tab. 9.1. Względna różnica emisji PM po wykorzystaniu DPF dla przejazdów badawczych

| Prędkość (km/h) | Przejazd |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 | 1A       | 2B     | 3A     | 4B     | 5C     | 6D     | 7      |
| 0               | +99,7%   | +20,6% | -9,9%  | -77,1% | -79,2% | -35,8% | -24,1% |
| (0-10)          | -5,8%    | -50,6% | -79,6% | -25,2% | -15,3% | -11,9% | —      |
| (10-20)         | —        | —      | -64,7% | -79,9% | —      | -36,9% | —      |

Wyjątek stanowiła praca pojazdu na postoju dla przejazdów 1A oraz 2B, kolejno wzrost emisji o 99,7% i 20,6%. Zjawiska te mogły być spowodowane błędami pomiarowymi PEMS, które wpłynęły na ostateczne wartości emisji PM. Jest to jednak mało prawdopodobna przyczyna, ponieważ aparatura PEMS odznacza się dużą dokładnością pomiarową i małym błędem pomiarowym. Zwiększona średnia emisja PM mogła być spowodowana przez warunki lokalne panujące w układzie wylotowym. Zjawisko to mogło wynikać z niższej temperatury spalin. Jednak analizując temperatury gazów wylotowych w obu przejazdach, były one do siebie bardzo zbliżone (Rys. 9.3a). Najbardziej prawdopodobną przyczyną wydaje się czynnik ludzki, który miał wpływ na zwiększoną emisję PM, a dokładniej, działania maszynisty, który na postoju z zamocowanym DPF pozostawił silnik pojazdu na zwiększonych obrotach prawdopodobnie w celu uzupełnienia powietrza w układzie hamulcowym. Potwierdzają to pomiary prędkości obrotowej silnika podczas przejazdu 1A. Po zakończonej jeździe z DPF silnik spalinowy wciąż pracował z prędkością roboczą, w porównaniu do analogicznego przejazdu bez zamontowanego filtra cząstek stałych (Rys. 9.3b).



Rys. 9.3. Wybrane warunki pracy dla przejazdu 1A: a) temperatury spalin: DPF1 i DPF2 – na wlocie do DPF (termopary); za DPF – na wylocie z DPF (pomiar przepływomierz); bez DPF – na końcu układu wylotowego (pomiar przepływomierz), b) prędkość obrotowa silnika spalinowego



Rys. 9.4. Wybrane wskaźniki pracy dla przejazdu 4B: a) emisja PM, b) zużycie paliwa

W przypadku przejazdu 4B, gdzie pojazd poruszał się pod pochyleniem toru przekraczające 30%, a maszynista zmieniał biegi, widoczna jest dla DPF zwiększona emisja PM dla postoju. Zastanawiające jest to, że opisywana wartość emisji 0,058 mg/s jest zbliżona do wartości dla zakresu prędkości (0-10) km/h 0,07 mg/s, a nawet przewyższa wartość dla zakresu (10-20) km/h 0,45 mg/s. Podobny przypadek występuje dla przejazdu 4B bez DPF, gdzie emisja PM na postoju 0,25 mg/s jest większa dla obu zakresów prędkości, gdy pojazd był w ruchu. Znacznie zwiększona emisja PM na postoju dla przejazdu bez DPF pochodzi z pojedynczego, bardzo dużego, lokalnego piku, dochodzącego do 2,49 mg/s na samym początku pomiarów (Rys. 9.4a). Pojedynczy zarejestrowany pik emisji PM był największym zarejestrowanym dla obu przejazdów. Prawdopodobną przyczyną tego zjawiska dla postoju jest w tym przypadku również czynnik ludzki. Zaobserwowane zostało bowiem chwilowe, znacznie zwiększone zużycie paliwa (Rys. 9.4b), które wynikało z pracy maszynisty.

Sytuacja jest bardzo zbliżona do początku pomiarów dla zakresu prędkości (0-10) km/h, gdzie zarejestrowane zostały znaczne piki emisji i zużycia paliwa.

Podobnie jak w etapie pierwszym średnie wyniki emisji PM, uzyskane podczas przejazdów badawczych, zostały odniesione do całodniowej, rzeczywistej pracy pojazdu WM-15A na szlaku. Na rysunku 9.5a przedstawione zostały oszacowane masy całkowite PM dla poszczególnych prac i zakresów prędkości. Wyniki odniesiono do komórek zgodnych z uzyskanymi zakresami udziałów czasowych prac podczas badań pomiarów emisji, tj. dla 71,43%. Największa oszacowana wartość PM podczas przejazdu z DPF zostałaby wyemitowana dla przejazdu z pełnymi wagonami. Dla przedziału prędkości (0-10) km/h wyniosłaby 104,2 mg. Z kolei dla postoju wyemitowana masa PM byłaby równa 68,7 mg, ze względu na bardzo długi czas postoju przed semaforem. Jest to zbliżona tendencja względem pomiarów bez DPF. Zarówno dla postoju jak i prędkości (0-10) km/h całkowita zsumowana masa PM dla wszystkich rodzajów prac wyniosłaby po 204 mg, tj. 42,15%.

| Numer przejazdu | Rodzaj pracy              | Prędkość (km/h) |          |          |          |          |          |          |          | Ogółem   |
|-----------------|---------------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                 |                           | 0               | (0-10>   | (10-20>  | (20-30>  | (30-40>  | (40-50>  | (50-60>  | (60-70>  |          |
| 7               | Przygotowanie pojazdu     | 4,175031        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 4,175031 |
| 6D              | Manewrowanie              | 44,85731        | 51,61713 | 48,56114 | b.d.     | b.d.     | b.d.     | b.d.     | 0        | 145,0356 |
| 4B              | Jazda z pustymi wagonami  | 39,79457        | 23,04225 | 17,56978 | b.d.     | b.d.     | b.d.     | b.d.     | b.d.     | 80,4066  |
| 5C              | Jazda z pełnymi wagonami  | 68,65915        | 104,178  | b.d.     | b.d.     | b.d.     | b.d.     | b.d.     | b.d.     | 172,8372 |
| 7               | Załadunek                 | 20,25098        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 20,25098 |
| 1A/2B           | Praca na torze i żurawiem | 15,31307        | 22,76124 | 0,37466  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 38,44897 |
| 3A/4B           | Przerwa w pracy           | 11,27675        | 2,557324 | 9,039723 | b.d.     | 0        | 0        | 0        | 0        | 22,87379 |
| Ogółem          |                           | 204,3269        | 204,1559 | 75,5453  | 0 / b.d. | 0 / b.d. | 0 / b.d. | 0 / b.d. | 0 / b.d. | 484,0281 |

| Numer przejazdu | Rodzaj pracy              | Prędkość (km/h) |         |         |          |          |          |          |          | Ogółem  |
|-----------------|---------------------------|-----------------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
|                 |                           | 0               | (0-10>  | (10-20> | (20-30>  | (30-40>  | (40-50>  | (50-60>  | (60-70>  |         |
| 7               | Przygotowanie pojazdu     | -24,14%         | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%    | 0,00%    | 0,00%    | 0,00%    | 0,00%    | -24,14% |
| 6D              | Manewrowanie              | -24,14%         | -11,88% | -31,04% | b.d.     | b.d.     | b.d.     | b.d.     | 0        | -22,91% |
| 4B              | Jazda z pustymi wagonami  | -24,14%         | -25,24% | -79,89% | b.d.     | b.d.     | b.d.     | b.d.     | b.d.     | -52,89% |
| 5C              | Jazda z pełnymi wagonami  | -24,14%         | -15,28% | b.d.    | b.d.     | b.d.     | b.d.     | b.d.     | b.d.     | -19,04% |
| 7               | Załadunek                 | -24,14%         | 0,00%   | 0,00%   | 0,00%    | 0,00%    | 0,00%    | 0,00%    | 0,00%    | -24,14% |
| 1A/2B           | Praca na torze i żurawiem | -24,14%         | -32,00% | -68,34% | 0,00%    | 0,00%    | 0,00%    | 0,00%    | 0,00%    | -29,89% |
| 3A/4B           | Przerwa w pracy           | -24,14%         | -62,48% | -75,62% | b.d.     | 0        | 0        | 0        | 0        | -61,08% |
| Ogółem          |                           | -24,14%         | -19,20% | -61,47% | 0 / b.d. | 0 / b.d. | 0 / b.d. | 0 / b.d. | 0 / b.d. | -32,59% |

Rys. 9.5. Zakresy prędkości i rodzaj pracy przy jeździe z DPF odniesione do rzeczywistego dnia pracy: a) szacowana całkowita wyemitowana masa PM (mg), b) szacowana względna redukcja PM (%) względem przejazdów bez DPF

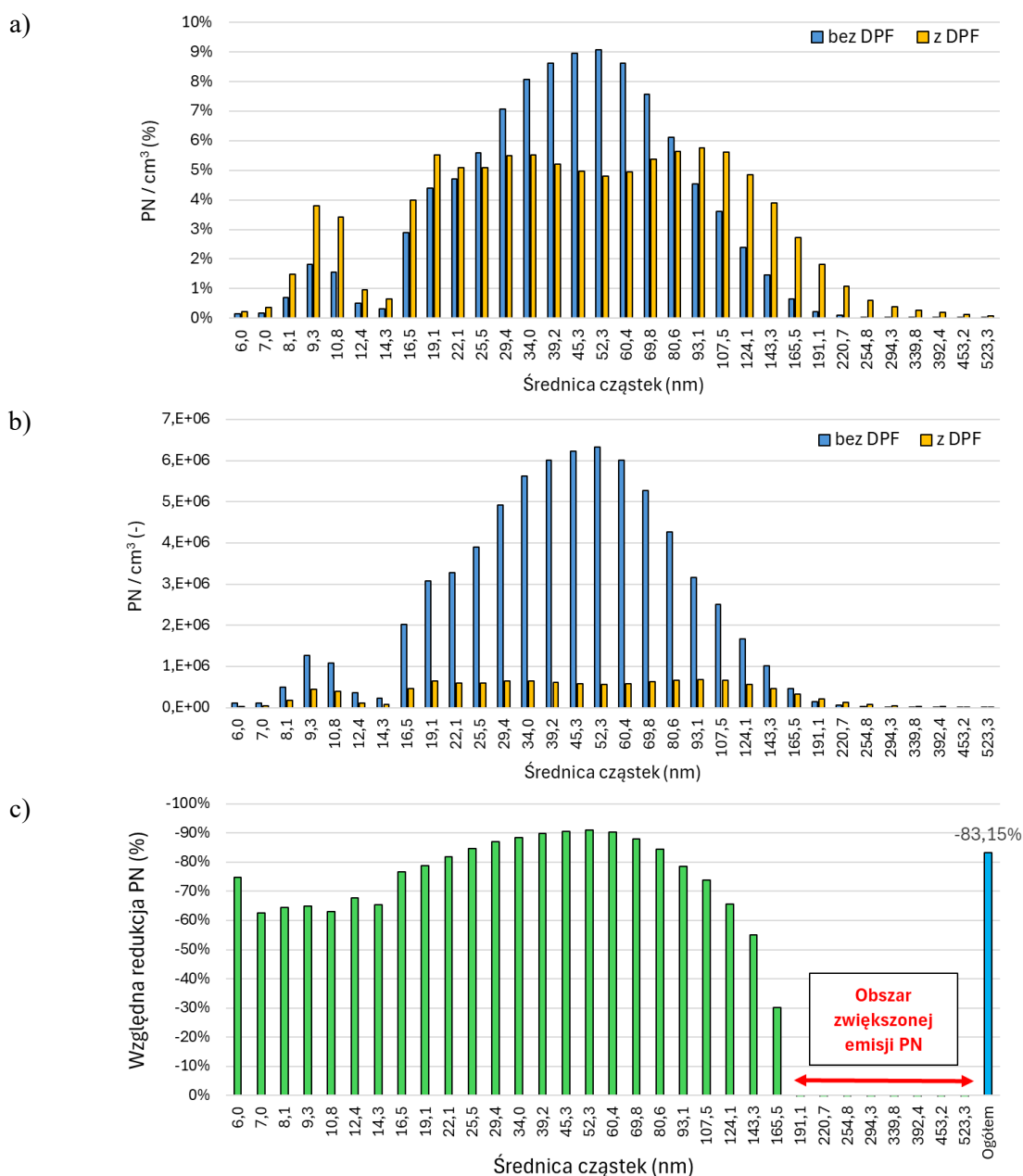
Na podstawie zestawienia oszacowanych wyników emisji spalin, dla rzeczywistego dnia pracy pojazdu WM-15A pracującego bez DPF i z DPF, obliczona została względna różnica w wyemitowanej masie PM dla poszczególnych rodzajów prac i zakresów prędkości (Rys. 9.5b). W przypadku uśrednionej emisji PM dla postoju, dla wszystkich rodzajów prac, redukcja emisji spalin, dzięki zastosowaniu DPF, wyniosła 24,14%. Najniższy stopień redukcji emisji PM (11,88%) przypadł dla zakresu prędkości (0-10) km/h podczas manewrowania. Podobnie było w przypadku jazdy z pełnymi wagonami, gdzie redukcja emisji PM wyniosła 15,28%. Dla zakresu (0-10) km/h największa różnica w emisji PM została osiągnięta podczas przerwy eksploatacyjnej, kiedy to pojazd wraz z wagonami w różnym stopniu napełnienia, musiał opuścić tor, na którym pracował. W tym wypadku ograniczenie emisji PM wyniosło 62,5%.

Dla prac w zakresie prędkości (10-20) km/h redukcja emisji PM wyniosła średnio 61,47%. Najmniejszy stopień redukcji wyniósł 31% dla manewrowania. Dla pozostałych prac stopień redukcji był znacząco większy i zawierał się od 68,34% podczas pracy na torze i pracy żurawiem do 79,9% dla jazdy z pustymi wagonami. Większa prędkość pojazdu wymusiła zwiększenie zapotrzebowania na moc, a to z kolei wpłynęło na większe zużycie paliwa. W konsekwencji wyższa temperatura spalin spowodowała podwyższenie temperatury samego filtra DPF. Widoczna jest tendencja wzrostu stopnia redukcji PM wraz z większą prędkością pojazdu. Wyższa temperatura spalin korzystnie oddziałuje na warunki pracy DPF i zwiększa jego efektywność. Jednakże, ze względu na znaczny udział czasu postoju oraz jazdy przy małych prędkościach, redukcja emisji PM podczas całego dnia pracy przy wykorzystaniu filtra cząstek stałych wyniosła 32,6%. Ze względu na ograniczone możliwości badawcze niemożliwa była weryfikacja emisji dla większych prędkości. Długość torów na bocznicie jest

niewystarczająca do rozwinięcia większych prędkości. Pomimo ograniczeń możliwe było odwzorowanie niemal 72% czasu pracy rzeczywistego przejazdu.

Rozkłady średnic cząstek stałych względem ich całkowitej liczby dla przejazdów bez DPF oraz po retrofittingu pojazdu zostały przedstawione na rysunku 9.6a. Dla przejazdu bez układu oczyszczania spalin zaobserwowano koncentrację PN wokół średnic cząstek o rozmiarze 45,3 nm oraz 52,3 nm. Udziały liczby cząstek stałych dla opisywanych średnic dochodzą do około 9% ich całkowitej liczby. Dla przejazdu z DPF rozkład średnic cząstek jest bardziej równomiernie rozłożony. Maksymalne udziały PN osiągają wartość do około 5,8% względem ich całkowitej liczby. Dla średnic cząstek od 19,1 nm do 124,1 nm udziały PN zawierają się w przedziale od około 4,8% do 5,8%. Jednocześnie, przejazd pojazdu po retrofittingu odznaczał się większym udziałem cząstek stałych o małych (od 6 nm do 22,1 nm) i dużych średnicach (od 93,1 nm do 523,3 nm).

Porównując liczbę cząstek stałych dla przejazdu po retrofittingu oraz bez DPF (Rys. 9.6c) widoczne są znaczące różnice pomiędzy zarejestrowanymi wartościami. Dla średnic cząstek od 6 nm do 165,5 nm

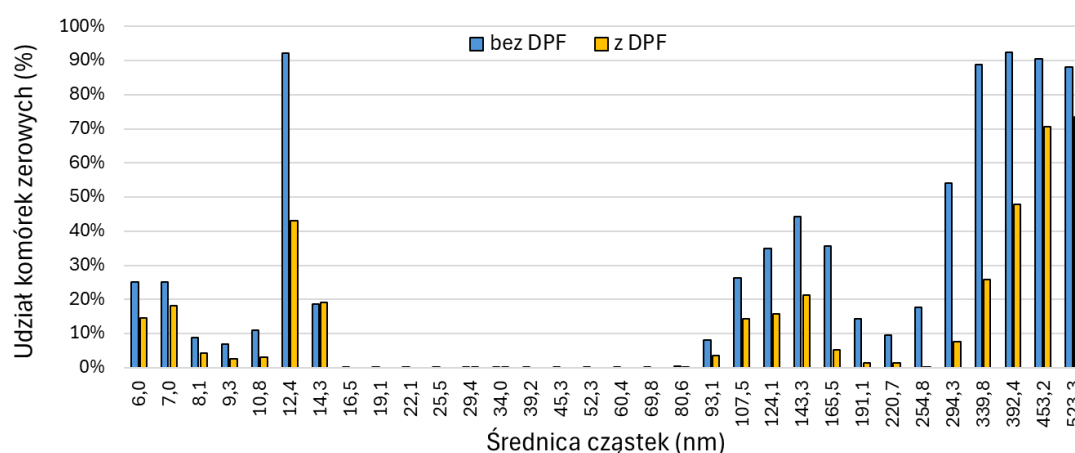


Rys.9.6. PN w zależności od średnicy cząstek stałych: a) rozkład procentowy, b) liczba PN, c) redukcja liczby PN przy wykorzystaniu DPF, względem przejazdu bez DPF

redukcja emisji PN wyniosła od 30 % do około 91 % (Rys. 9.6c). Ogólna redukcja PN dla przejazdu z DPF wyniosła 83,15%. Jednakże od osiągnięcia maksymalnej redukcji dla średnicy 52,3 nm widoczny jest stopniowy spadek wskaźnika redukcji liczby cząstek wraz ze wzrostem ich rozmiarów. Dla średnic cząstek o wymiarach od 191,1 nm do 523,3 nm, zaobserwowano zwiększoną liczbę PN względem przejazdu bez DPF. Liczba cząstek stałych dla przejazdu z filtrem, dla opisywanego zakresu średnic, stanowi względnie mały udział i jest równa 4,6% całkowitej liczby.

Wyjaśnieniem wzrostu liczby PN dla większych średnic może być zjawisko aglomeracji cząstek stałych, kiedy to zwiększa się ich powierzchnia [23,25]. Agregacja występuje w układzie wylotowym, gdzie dochodzi również do zjawiska dyfuzji, podczas którego zwiększa się masa cząstki. W przypadku przejazdu z DPF następuje znaczne przyspieszenie przepływu gazów na wylocie z filtra, ze względu na zwiężającą się geometrię. Sprzyja to przepływowi turbulentnemu, gdzie cząstki zderzają się ze sobą i następuje proces aglomeracji. Dodatkowo odległość od komory spalania silnika do poboru próbek spalin była wydłużona o wymiar wzdłużny filtra, czyli około 860 mm. Dłuższa odległość drogi spalin również może mieć wpływ na zwiększenie ich średnicy.

Analizując wyniki pomiarów aparatury EEPS zwrócono uwagę na udział komórek z wartością zerową (Rys. 9.7). Dla obu przejazdów i zakresu średnic od 16,5 nm do 80,6 nm udział komórek zerowych jest pomijalny. Jednak dla pozostałych średnic, szczególnie dla przejazdu bez DPF, udziały te w pewnych zakresach dochodzą do 35%, a dla średnicy 12,4 nm oraz średnic większych od 339,8 nm udział komórek zerowych osiąga wartości rzędu 90%. Według danych producenta liczba cząstek stałych dla poszczególnych średnic jest mierzona jedynie w odpowiednich okienkach pomiarowych [127]. Oznacza to, że liczba cząstek stałych jest rejestrowana i zapisywana tylko wówczas, gdy liczba zawiera się powyżej minimalnego i poniżej maksymalnego zakresu pomiarowego. W przypadku, gdy zmierzona wartość jest za niska lub za wysoka, aparatura przypisuje wartość zerową.



Rys. 9.7. Udział komórek zerowych zarejestrowany przez EEPS podczas badań

Potencjalnym źródłem obserwowanego zjawiska są ograniczenia dokładności pomiarowej EEPS. Dla części pomiarów PN, ich liczba mogła być za niska względem minimum pomiarowego, co skutkowało podaniem wartości „0”. Jednakże, dla wszystkich średnic cząstek, udział wartości zerowych jest większy dla przejazdu bez DPF. Dodatkowo, należy również wziąć pod uwagę rozkład liczby cząstek (Rys. 9.6b), gdzie dla przejazdu bez DPF liczba wyemitowanych PN była znacznie większa względem przejazdu z DPF. Pojazdem badawczym był czterdziestoletni pojazd szynowy, który potencjalnie należy zaliczyć do grona pojazdów o podwyższonej emisyjności. Na bazie przytoczonych danych zakłada się, że znaczna część wyników zerowych mogła wynikać z przekroczenia zakresu pomiarowego aparatury EEPS. Niemożliwe jest jednak określenie, ile z wartości zerowych wynika ze zbyt małej liczby PN, a ile z przekroczenia okna pomiarowego.

Na podstawie przeprowadzonych analiz oraz doświadczenia badawczego zespołu przyjęto założenie, że znacząca większość komórek zerowych pochodzi z przekroczenia limitu pomiarowego. Oznaczałoby to, że rzeczywista liczba cząstek stałych wyemitowana w przejeździe przed retrofittingiem byłaby znacznie większa niż ta zarejestrowana. Dla przejazdu z DPF również można założyć, że rzeczywista emisja liczby cząstek stałych mogła być większa, szczególnie dla średnic

większych od 339,8 nm. Należy jednak zauważyć, że biorąc pod uwagę zarejestrowaną liczbę komórek zerowych, rzeczywista liczba PN w dalszym ciągu byłaby znacząco mniejsza względem przejazdu bez DPF.

Obliczenia dotyczące liczby cząstek stałych zostały przeprowadzone wyłącznie dla wartości zawierających się w oknie pomiarowym. Oznacza to, że wartości zerowe zostały celowo pominięte. Wykorzystanie do obliczeń komórek zerowych mogłoby znacząco wpłynąć na ostateczne wyniki, np. przy uśrednianiu PN wartość końcowa byłaby znacznie zaniżona względem wartości zarejestrowanych.

## 10. Wnioski

### Wnioski ogólne

- Dobrano filtr DPF do retrofitingu pojazdu szynowego na podstawie parametrów eksploatacyjnych pojazdu za pomocą obliczeniowej mechaniki płynów CFD.
- Przeprowadzona w rzeczywistych warunkach eksploatacji weryfikacja potwierdza skuteczność działania wybranego rozwiązania pod względem redukcji PM oraz PN.
- Retrofitting jest efektywnym sposobem na ograniczenie emisji związków szkodliwych spalin i poprawę parametrów ekologicznych dla będących już w eksploatacji pojazdów starszego typu.

### Wnioski metodyczne

Skuteczność całego procesu doboru i aplikacji filtra DPF była zależna od przyjętego schematu postępowania. Ścieżka działania musiała gwarantować wykonalność, spełniać kryteria i wymagania eksploatacyjne oraz być zasadna finansowo. Metoda powinna również być replikowalna w celu możliwości jej odtworzenia w podobnych badaniach.

Schemat postępowania wykorzystany w pracy, który może być stosowany w procesie retrofitingu spalinowego pojazdu szynowego o filtr cząstek stałych, powinien się składać z następujących etapów:

- dokonania przeglądu literatury z obszaru istniejących metod i rozwiązań w celu redukcji emisji cząstek stałych z eksploatowanych pojazdów szynowych lub maszyn z grupy NRMM,
- określenia charakteru pracy, przeznaczenia oraz parametrów eksploatacyjnych pojazdu do retrofitingu,
- dokonania wstępnej analizy konstrukcji pojazdu pod względem możliwości potencjalnej aplikacji układu oczyszczania spalin na pojeździe,
- określenia poziomu emisji cząstek stałych w zależności od warunków eksploatacyjnych,
- opracowania kryteriów poprawnego doboru filtra cząstek stałych,
- wytypowania wstępnego rozwiązania konstrukcyjnego filtra DPF do retrofitingu,
- określenia wstępnych parametrów technicznych dla liczby  $n$  analizowanych filtrów, różniących się od siebie wymiarami oraz / lub objętością nośnika,
- określenia charakterystycznych punktów pracy silnika oraz pojazdu,
- wykonania symulacji obliczeniowej mechaniki płynów dla modeli wirtualnych filtrów DPF, na podstawie rzeczywistych warunków eksploatacyjnych, w celu analizy i wyboru najkorzystniejszego rozwiązania,
- wykonania weryfikacji poprawności działania wybranego rozwiązania na pojeździe w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

### Wnioski szczegółowe

- Udziały czasu pracy pojazdów szynowych, a w konsekwencji ich silników spalinowych, różnią się od siebie w zależności od rodzaju pojazdu, przeznaczenia, wykonywanej pracy oraz warunków lokalnych takich jak infrastruktura, miejsce pracy, priorytet przejazdowy.
- Częstym zjawiskiem w obszarze kolejowym jest wykonywanie prac innych niż docelowo przewidziane w procesie konstrukcyjnym przez pojazdy szynowe. Wyjątkiem są pojazdy pasażerskie. Wynika to przede wszystkim z lokalnej dostępności taboru.
- W głównej mierze największy udział czasu pracy pojazdów szynowych stanowi praca na biegu jałowym.
- Ze względu na zróżnicowany charakter pracy, wykorzystanie lub opracowanie jednego, uniwersalnego testu badawczego, który w rzeczywisty sposób mógłby odwzorowywać realną pracę, jest niemożliwe. Dotyczy to zarówno grupy pojazdów specjalnego przeznaczenia jak i pozostałych rodzajów pojazdów szynowych.
- Widoczny jest wpływ rozmiarów filtra cząstek stałych na jego skuteczność i parametry pracy. Powodem są różnice w prędkości przepływu oraz czas przebywania spalin w fazie porowatej.
- Wykorzystanie prototypowego filtra do retrofitingu pojazdu szynowego pozwoliło na średnią redukcję PM o 32,6%, a PN o 83% dla rozpatrywanej trasy.

- Przy użyciu DPF redukcję PN odnotowano przede wszystkim dla małych i średnich rozmiarów cząstek. Zwiększeniu uległa emisja PN dla średnic o rozmiarach większych niż 191,1 nm. Geometria filtra, ze względu na zwężenie i przyspieszenie przepływu spalin na wylocie, może sprzyjać zderzaniu się cząstek stałych. Z tego powodu prawdopodobną przyczyną zarejestrowania zwiększonej liczby cząstek o dużych rozmiarach jest zjawisko aglomeracji występujące w układzie wylotowym.
- Aparatura EEPS, określająca rozmiar i liczbę cząstek stałych, zarejestrowała znaczny udział komórek zerowych dla małych i dużych rozmiarów cząstek. Oznacza to brak pomiaru ze względu na liczbę cząstek poza zakresem pomiarowym. Przypadek ten zarejestrowano dla obu przejazdów, jednak udział komórek zerowych był większy dla pomiarów przed retrofittingiem. Weryfikacja zagadnienia jest niemożliwa na tym etapie badań. Może to oznaczać, że rzeczywista liczba cząstek dla małych i dużych rozmiarów była większa. Stopień redukcji PN również może się różnić, jednak wciąż na korzyść redukcji PN.

### **Wnioski wdrożeniowe**

- Rozpatrując ilostan, średni wiek taboru kolejowego w Polsce, przepisy dotyczące utrzymania pojazdów kolejowych, a także tempo wymiany taboru na nowy stwierdza się, że retrofitting układów redukujących emisję związków toksycznych spalin z pojazdów szynowych jest korzystnym i perspektywicznym działaniem w celu poprawy parametrów ekologicznych eksploatowanego taboru starszej generacji.
- Ze względu na wykorzystanie układów oczyszczania spalin, cechujących się znacznymi gabarytami, należy zaprojektować rozmieszczenie układu w taki sposób, aby nie wpływał on na pogorszenie ergonomii pracy osób użytkujących pojazd. Dodatkowo układ nie może przekraczać obrysu skrajni kolejowej pojazdu, ze względu na brak dopuszczenia pojazdu do poruszania się po linii kolejowej.
- Filtr cząstek stałych powinien być umieszczony jak najbliżej silnika spalinowego ze względu na ograniczenie strat cieplnych przepływających spalin z komory spalania silnika do wlotu DPF. Powodem jest to, że filtr cząstek stałych pracuje skuteczniej w wyższych temperaturach.
- Pomimo znacznego udziału czasu pracy pojazdów szynowych na biegu jałowym, dochodzącym do 90%, objętość nośnika filtra DPF do reretrofitingu powinna być dobierana dla większych wartości masowego natężenia przepływu spalin, nawet jeśli udział czasu pracy przy większym obciążeniu jest niewielki. Powodem jest zmniejszenie oporów przepływu, a w konsekwencji mniejsze zużycie paliwa. Ze względu na zastosowanie większej objętości nośnika wydłuża się czas eksploatacji pojazdu do osiągnięcia maksymalnego dopuszczalnego gradientu ciśnienia.
- Obowiązujące regulacje prawne nie zawierają zapisów dotyczących wykorzystania retrofitingu jako obowiązkowego działania w celu redukcji emisji spalin z eksploatowanych pojazdów kolejowych starszej generacji. Oddolna inicjatywa zaadaptowania retrofitingu w pojazdach przez przewoźników lub właścicieli taboru, ze względu na konieczność inwestycji środków finansowych, na tę chwilę wydaje się zatem mało prawdopodobna.

### **Wnioski perspektywiczne**

- Przedstawiona w pracy metoda jest możliwa do przeskalowania na inne pojazdy różniące się typem oraz przeznaczeniem względem pojazdu badawczego.
- Korzystnym z punktu widzenia poprawy wskaźników emisyjnych oraz eksploatacyjnych jest analiza wpływu doboru filtra do układu DOC i jego integracja z DPF. Umożliwi to regenerację pasywną filtra.
- Eksploatacja obserwowana pojazdu i dobranego filtra DPF w dłuższym czasie pozwoli na wyciągnięcie dokładniejszych i bardziej wartościowych wniosków oraz poznanie potencjalnych wyzwań i problemów, które mogą pojawić się podczas użytkowania.
- W celu kompleksowej redukcji związków toksycznych spalin za pomocą retrofitingu zasadnym jest wykonanie badań z wykorzystaniem układu SCR i analizy wpływu działania na emisję NO<sub>x</sub>.

## Bibliografia

- [1] Bao L, Kusadokoro M, Chitose A, Chen C. Development of socially sustainable transport research: A bibliometric and visualization analysis. *Travel Behaviour and Society* 2023;30:60–73. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2022.08.012>.
- [2] Huang Y, Lee CKC, Yam Y-S, Mok W-C, Zhou JL, Zhuang Y, et al. Rapid detection of high-emitting vehicles by on-road remote sensing technology improves urban air quality. *Science Advances* 2022;8:eabl7575. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abl7575>.
- [3] Leach F, Kalghatgi G, Stone R, Miles P. The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. *Transportation Engineering* 2020;1:100005. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005>.
- [4] OPEC. World Oil Outlook 2013. Organization of the Petroleum Exploring Countries; n.d.
- [5] Radziszewski P, Urbański P, Rozynek Ł, Ciepły P, Barański M, Cierniewski M. Modular hydrogen fuel cell propulsion test stand for railway applications. *Combustion Engines* 2025;201:158–64. <https://doi.org/10.19206/CE-204513>.
- [6] Jiang C, Wan Y, Yang H, Zhang A. Impacts of high-speed rail projects on CO<sub>2</sub> emissions due to modal interactions: A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2021;100:103081. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103081>.
- [7] Statista. EU-27: CO<sub>2</sub> emissions shares by sector 2020. Statista 2022. <https://www.statista.com>.
- [8] European Environment Agency. Transport and environment report 2021 — Decarbonising road transport — the role of vehicles, fuels and transport demand 2021. <https://www.eea.europa.eu>.
- [9] Ritchie H. Cars, planes, trains: where do CO<sub>2</sub> emissions from transport come from? *Our World in Data* 2020.
- [10] The International Energy Agency. Transport sector CO<sub>2</sub> emissions by mode in the Sustainable Development Scenario, 2000-2030. IEA n.d. <https://www.iea.org>.
- [11] Annadanam SK, Kota SH. Emission of greenhouse gases and criteria pollutants from railways in India estimated using a modified top-down approach. *Journal of Cleaner Production* 2019;213:610–7. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.206>.
- [12] Liu H, Zhang Y, Zhu Q, Chu J. Environmental efficiency of land transportation in China: A parallel slack-based measure for regional and temporal analysis. *Journal of Cleaner Production* 2017;142:867–76. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.048>.
- [13] Shinde AM, Dikshit AK, Singh RK, Campana PE. Life cycle analysis based comprehensive environmental performance evaluation of Mumbai Suburban Railway, India. *Journal of Cleaner Production* 2018;188:989–1003. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.022>.
- [14] Statista. Electrified rail network in Europe, by country. Statista 2021. <https://www.statista.com>.
- [15] Urząd Transportu Kolejowego. Tabor kolejowy przewoźników towarowych - stan obecny i plany do 2023 r. Urząd Transportu Kolejowego 2018. <https://utk.gov.pl>.
- [16] Eurostat. Railway transport measurement - goods. Goods transported. 2025. <https://ec.europa.eu/eurostat>.
- [17] Urząd Transportu Kolejowego. Sprawozdanie z funkcjonowania rynku transportu kolejowego w 2023 r. Urząd Transportu Kolejowego 2024. <https://utk.gov.pl>.
- [18] Anilovich I, Hakkert AS. Survey of vehicle emissions in Israel related to vehicle age and periodic inspection. *Science of The Total Environment* 1996;189–190:197–203. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(96\)05210-2](https://doi.org/10.1016/0048-9697(96)05210-2).
- [19] Huang Y, Ng ECY, Surawski NC, Yam Y-S, Mok W-C, Liu C-H, et al. Large eddy simulation of vehicle emissions dispersion: Implications for on-road remote sensing measurements. *Environmental Pollution* 2020;259:113974. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.113974>.
- [20] Ma Y, Huang Y, Wu J, E J, Zhang B, Han D, et al. A review of atmospheric fine particulate matters: chemical composition, source identification and their variations in Beijing. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 2022;44:4783–807. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2075991>.
- [21] Health Effects Institute. State of Global Air Annual Report 2024. Health Effects Institute 2024. <https://www.stateofglobalair.org>.
- [22] Stelmach S, Wasielewski R, Figa J. Tlenki azotu w procesach spalania. *Karbo* 2002;3:88–94.

- [23]Pielecha J, Merksiz J. Opportunities to evaluate emission of particulate matter from the combustion engines of rail vehicles. Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe 2019;2019:1–14. <https://doi.org/10.53502/RAIL-138535>.
- [24]Kittelson DB. Engines and nanoparticles: a review. Journal of Aerosol Science 1998;29:575–88. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(97\)10037-4](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(97)10037-4).
- [25]Kittelson DB, Arnold M, Watts WF. Review of diesel particulate matter sampling methods. Minneapolis, Minnesota, USA: University of Minnesota, Department of Mechanical Engineering, Center for Diesel Research; 1999.
- [26]Siedlecki M, Ziółkowski A, Fuć P, Lijewski P. Methods of reducing emission from HDV Euro VI engines. Combustion Engines 2015;162:480–6.
- [27]Materiały firm: DAF, Iveco, MAN, Scania, Daimler Trucks, Renault, Volvo. n.d.
- [28]Huang Y, Organ B, Zhou JL, Surawski NC, Hong G, Chan EFC, et al. Emission measurement of diesel vehicles in Hong Kong through on-road remote sensing: Performance review and identification of high-emitters. Environmental Pollution 2018;237:133–42. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.043>.
- [29]Czerwinski J, Zimmerli Y, Mayer A. Experiences about retrofitting of City Busses with DPF's. Combustion Engines 2006;124:38–53. <https://doi.org/10.19206/CE-117360>.
- [30]Fleischman R, Amiel R, Czerwinski J, Mayer A, Tartakovsky L. Buses retrofitting with diesel particle filters: Real-world fuel economy and roadworthiness test considerations. Journal of Environmental Sciences 2018;67:273–86. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.09.011>.
- [31]Smit R, Keramydas C, Ntziachristos L, Lo T, Ng K, Wong HA, et al. Evaluation of Real-World Gaseous Emissions Performance of Selective Catalytic Reduction and Diesel Particulate Filter Bus Retrofits. Environ Sci Technol 2019;53:4440–9. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b07223>.
- [32]Zhang Q, Zhu Y. Performance of School Bus Retrofit Systems: Ultrafine Particles and Other Vehicular Pollutants. Environ Sci Technol 2011;45:6475–82. <https://doi.org/10.1021/es201070t>.
- [33]Johnson DR, Bedick CR, Clark NN, McKain DL Jr. Design and Testing of an Independently Controlled Urea SCR Retrofit System for the Reduction of NOx Emissions from Marine Diesels. Environ Sci Technol 2009;43:3959–63. <https://doi.org/10.1021/es900269p>.
- [34]Siedlecki M, Lijewski P, Weymann S. Analysis of tractor particulate emissions in a modified NRSC test after implementing a particulate filter in the exhaust system. MATEC Web Conf 2017;118:00028. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711800028>.
- [35]Siedlecki M, Szymlet N, Fuć P, Kurc B. Analysis of the Possibilities of Reduction of Exhaust Emissions from a Farm Tractor by Retrofitting Exhaust Aftertreatment. Energies 2022;15:7963. <https://doi.org/10.3390/en15217963>.
- [36]Park PW, Downey M, Youngren D, Bruestle C. Advanced aftertreatment system development for a locomotive application, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection; 2013, p. 591–600. <https://doi.org/10.1115/ICEF2012-92198>.
- [37]Sprawozdanie z funkcjonowania rynku transportu kolejowego w 2022 r. Urząd Transportu Kolejowego 2023. <https://utk.gov.pl>.
- [38]Independent Regulator's Group - Rail. 11th MM Report - 2023. IRG Rail n.d. <https://irg-rail.eu>.
- [39]Gallas D, Stobnicki P, Bolzhelarskyi Y. Types and applications of hydrogen fuel cells in transport. Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe 2022;2022:31–6. <https://doi.org/10.53502/RAIL-157018>.
- [40]Durzyński Z. Hydrogen-powered drives of the rail vehicles (part 1). Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe 2021;2021:29–40. <https://doi.org/10.53502/RAIL-139980>.
- [41]Durzyński Z. Hydrogen-powered drives of the rail vehicles (part 2). Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe 2021;2021:1–11. <https://doi.org/10.53502/RAIL-142694>.
- [42]Michalak P, Merksiz J, Stawecki W, Andrzejewski M, Daszkiewicz P. The selection of the engine unit - main engine generator during the modernization of the 19D/TEM2 locomotive. Combustion Engines 2020;182:38–46. <https://doi.org/10.19206/CE-2020-307>.
- [43]Michalak P, Urbański P, Podziński M, Dobrowolski P. Possibility to use a dual-drive locomotive type 111DE for passenger transport in the territory of Poland. WJTE 2023;136:35–47. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.4038>.
- [44]Intercity PKP. W grupie różnie... i taniej – nowa oferta PKP Intercity. [www.intercity.pl](http://www.intercity.pl) n.d. <https://www.intercity.pl>.

- [45] Intercity PKP. Więcej pociągów PKP Intercity w wakacje. [www.intercity.pl](http://www.intercity.pl) n.d. <https://www.intercity.pl>.
- [46] Cantner F, Nachtigall N, Hamm LS, Cadavid A, Adenaw L, Loder A, et al. A nation-wide experiment: fuel tax cuts and almost free public transport for three months in Germany -- Report 2 First wave results 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.10510>.
- [47] Weiß A, Ecke L, Kettner B, Weber U. Das 9-Euro-Ticket kommt – Strohfeuer, Verkehrswende oder Symbolpolitik? 2022. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu>.
- [48] Strategia Zrównoważonego Rozwoju Transportu do 2030 roku. Ministerstwo Infrastruktury n.d. <https://www.gov.pl>.
- [49] Tabor kolejowy 2019. Office of Rail Transport n.d. <https://utk.gov.pl/pl>.
- [50] Pojazdy hybrydowe ► 36WEh. Koleje Dolnośląskie n.d. <https://kolejedolnoslaskie.pl>.
- [51] Pierwsze polskie Hybrydy pojadą do Szczecina | Newag SA 2020. <https://www.newag.pl>.
- [52] Podkarpackie: 10 EZT i 5 hybryd ze środków KPO n.d. <https://www.rynek-kolejowy.pl>.
- [53] Michalak P, Urbański P, Jakuszko W, Gallas D, Stobnicki P, Tarnawski P. Technical aspects of the selection of an engine-generator set for a dual-drive locomotive. *Combustion Engines* 2024;197:97–105. <https://doi.org/10.19206/CE-176799>.
- [54] Kędra Z. Technologia robót torowych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej; 2015.
- [55] Urząd Transportu Kolejowego. Krajowy Rejestr Pojazdów Kolejowych (NVR). Portal statystyczny UTK 2021. <https://dane.utk.gov.pl>.
- [56] Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej. Obwieszczenie Ministra Infrastruktury z dnia 11 kwietnia 2019 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej w sprawie sposobu prowadzenia rejestru oraz sposobu oznakowania pojazdów kolejowych.
- [57] Merkisz J, Rymaniak Ł, Lijewski P, Kamińska M, Kurc B. Tests of ecological indicators of two-way vehicles meeting Stage IIIB and Stage IV standards in real operating conditions. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe* 2020;2020:1–9. <https://doi.org/10.53502/RAIL-138495>.
- [58] Gallas D, Stobnicki P. Adoption of Modern Hydrogen Technologies in Rail Transport. *J Ecol Eng* 2022;23:84–91. <https://doi.org/10.12911/22998993/145291>.
- [59] Gallas D, Stobnicki P, Jakuszko W, Urbański P, Kikut J. Application of alternative drive systems in modern special-purpose rail vehicles. *WJTE* 2023;136:23–33. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.3417>.
- [60] Marciniak Z, Pielecha I. Badania silników lokomotyw spalinowych w świetle dopuszczeń do eksploatacji na torach polskich linii kolejowych. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe* 2006;2006:31–44. <https://doi.org/10.53502/RAIL-139825>.
- [61] Pielecha I, Marciniak Z. Wymagania w zakresie ograniczenia emisji toksycznych składników spalin przez spalinowe pojazdy trakcyjne. *Technika Transportu Szynowego* 2006:63–77.
- [62] Andrzejewski M, Daszkiewicz P, Rymaniak Ł, Merkisz J, Kamińska M. Impact of modernization of locomotives operated in Poland on the emission of toxic compounds in exhaust gases. *atest* 2018;19:54–7. <https://doi.org/10.24136/atest.2018.353>.
- [63] Karta UIC 623-2, Badania homologacyjne silników spalinowych pojazdów napędowych. Wyd. 3 z kwietnia 2005 n.d.
- [64] Karta UIC 624 Badanie emisji gazów wydechowych silników spalinowych trakcyjnych. Wyd. 2 z kwietnia 2003 n.d.
- [65] Giakoumis EG. Non-Road Engines. In: Giakoumis EG, editor. *Driving and Engine Cycles*, Cham: Springer International Publishing; 2017. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-49034-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-49034-2_5).
- [66] Dyrektywa 97/68/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 grudnia 1997 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do środków dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojedźnych nieporuszających się po drogach. vol. 13, 020. 1997.
- [67] Dyrektywa 2002/88/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 9 grudnia 2002 r. zmieniająca dyrektywę 97/68/WE w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do środków dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojedźnych nieporuszających się po drogach. vol. 13, 031. 2002.

- [68] Dyrektywa 2004/26/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 21 kwietnia 2004 r. zmieniająca dyrektywę 97/68/WE w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do środków dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojezdnych nieporuszających się po drogach Tekst mający znaczenie dla EOG. Rozdział 13 Tom 34
- [69] Dyrektywa Rady 2006/105/WE z dnia 20 listopada 2006 r. dostosowująca dyrektywy 73/239/EWG, 74/557/EWG i 2002/83/WE w dziedzinie środowiska naturalnego, w związku z przystąpieniem Bułgarii i Rumunii. vol. 363. 2006.
- [70] Dyrektywa Komisji 2010/26/UE z dnia 31 marca 2010 r. zmieniająca dyrektywę 97/68/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie zbliżenia ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do środków dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojezdnych nieporuszających się po drogach (Tekst mający znaczenie dla EOG). vol. 086. 2010.
- [71] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2011/88/UE z dnia 16 listopada 2011 r. zmieniająca dyrektywę 97/68/WE w odniesieniu do przepisów dotyczących silników wprowadzanych do obrotu według formuły elastycznej Tekst mający znaczenie dla EOG. vol. 305. 2011.
- [72] Dyrektywa Komisji 2012/46/UE z dnia 6 grudnia 2012 r. zmieniająca dyrektywę 97/68/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie zbliżenia ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do środków dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojezdnych nieporuszających się po drogach Tekst mający znaczenie dla EOG. vol. 353. 2012.
- [73] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/1628 z dnia 14 września 2016 r. w sprawie wymogów dotyczących wartości granicznych emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych oraz homologacji typu w odniesieniu do silników spalinowych wewnętrznego spalania przeznaczonych do maszyn mobilnych nieporuszających się po drogach, zmieniające rozporządzenia (UE) nr 1024/2012 i (UE) nr 167/2013 oraz zmieniające i uchylające dyrektywę 97/68/WE.
- [74] Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2017/654 z dnia 19 grudnia 2016 r. uzupełniające rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/1628 odnośnie do wymogów technicznych i ogólnych dotyczących wartości granicznych emisji i homologacji typu w odniesieniu do silników spalinowych wewnętrznego spalania przeznaczonych do maszyn mobilnych nieporuszających się po drogach. vol. 102. 2016.
- [75] Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2017/655 z dnia 19 grudnia 2016 r. uzupełniające rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/1628 odnośnie do monitorowania emisji zanieczyszczeń gazowych z silników spalinowych wewnętrznego spalania w trakcie eksploatacji zamontowanych w maszynach mobilnych nieporuszających się po drogach (Tekst mający znaczenie dla EOG. ). vol. 102. 2016.
- [76] Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2018/987 z dnia 27 kwietnia 2018 r. w sprawie zmiany i sprostowania rozporządzenia delegowanego (UE) 2017/655 uzupełniającego rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/1628 odnośnie do monitorowania emisji zanieczyszczeń gazowych z silników spalinowych wewnętrznego spalania w trakcie eksploatacji zamontowanych w maszynach mobilnych nieporuszających się po drogach (Tekst mający znaczenie dla EOG.). vol. 182. 2018.
- [77] Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2018/989 z dnia 18 maja 2018 r. w sprawie zmiany i sprostowania rozporządzenia delegowanego Komisji (UE) 2017/654 uzupełniającego rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/1628 odnośnie do wymogów technicznych i ogólnych dotyczących wartości granicznych emisji i homologacji typu w odniesieniu do silników spalinowych wewnętrznego spalania przeznaczonych do maszyn mobilnych nieporuszających się po drogach (Tekst mający znaczenie dla EOG.). vol. 182. 2018.
- [78] Rada Unii Europejskiej. Dyrektywa Rady z dnia 6 lutego 1970 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich w odniesieniu do homologacji typu pojazdów silnikowych i ich przyczep. vol. 13, 001. 1970.
- [79] Kotus M, Pexa M, Kubín K. Modelling of non-road transient cycle. *Journal of Central European Agriculture* 2013;14:1298–311. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/14.4.1344>.

- [80]Roth M. Deutz Certified by EU Stage V Emissions Standards on TTCD 6.1 Engine. Rental Equipment Register 2017. <https://www.rermag.com>.
- [81]Far M, Gallas D, Urbański P, Woch A, Mieźowiec K. Modern combustion-electric PowerPack drive system design solutions for a hybrid two-unit rail vehicle. *Combustion Engines* 2022;190:80–7. <https://doi.org/10.19206/CE-144724>.
- [82]Batko M. The concept of balanced maintenance cycle of a railway vehicle. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe* 2019;1:26–38. <https://doi.org/10.53502/RAIL-138504>.
- [83]Kamińska M, Urbański P. Assessment of the Environmental Costs of Rail Buses in Poland Based on Research in Real Operating Conditions. *Adv Sci Technol Res J* 2024;18:215–28. <https://doi.org/10.12913/22998624/193458>.
- [84]Biuletyn Informacji Publicznej Urzędu Marszałkowskiego Województwa Lubuskiego. Dokumentacja Systemu Utrzymania spalinowego zespołu trakcyjnego typu 220M n.d. <https://bip.lubuskie.pl>
- [85]Frey HC, Choi H-W, Kim K. Measurement of the Energy Use and Emissions of Passenger Rail Locomotives Using a Portable Emission Measurement System. In *Proceedings of the 102nd Annual Conference and Exhibition Air and Waste Management Association*, Detroit, MI, USA 2019:16–9.
- [86]Yuan W, Frey HC. Multi-scale evaluation of diesel commuter rail fuel use, emissions, and eco-driving. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2021;99:102995. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102995>.
- [87]Andrzejewski M, Fuć P, Gallas D. Impact of driving style on the exhaust emission of a diesel multiple unit. *Computers in Railways XVII: Railway Engineering Design and Operation* 2020;199:365. <https://doi.org/10.2495/CR200341>.
- [88]Andrzejewski M, Nowak M, Gallas D, Świechowicz R. Investigation of Driving Style Impact on the Ecological Indicators of a Diesel Multiple Unit (SAE Paper 2020-01-2213). *SAE Technical Paper*; 2020.
- [89]Bannikov MG, Chattha JA. Oxides of Nitrogen (NOx) Emission Levels of Diesel Engines of Switch Locomotives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 2006;220:449–57. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE185>.
- [90]Carvalhoes BB, Rosa R de A, D’Agosto M de A, Ribeiro GM. A method to measure the eco-efficiency of diesel locomotive. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2017;51:29–42. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.031>.
- [91]Poola RB, Sekar R. Reduction of NOx and Particulate Emissions by Using Oxygen-Enriched Combustion Air in a Locomotive Diesel Engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 2003;125:524–33. <https://doi.org/10.1115/1.1563236>.
- [92]Gautam A, Agarwal AK. Experimental investigations of comparative performance, emission and combustion characteristics of a cottonseed biodiesel-fueled four-stroke locomotive diesel engine. *International Journal of Engine Research* 2013;14:354–72. <https://doi.org/10.1177/1468087412458215>.
- [93]Andrzejewski M, Daszkiewicz P, Merksiz J, Stawecki W, Gallas D. Fuel consumption and pollutants emission study of locomotives performed using a water rheostat. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe* 2018;2018:11–7. <https://doi.org/10.53502/RAIL-138510>.
- [94]Andrzejewski M, Daszkiewicz P, Urbański P, Rymaniak Ł, Woch A. Impact of a locomotive engine modernization on fuel consumption. *MATEC Web Conf* 2021;338:01001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133801001>.
- [95]Urbański P, Huang Y, Gallas D, Zhou JL, Merksiz J. Real-world assessment of the energy consumption and emissions performance of a novel diesel-electric dual-drive locomotive. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 2024;71:104017. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104017>.
- [96]Rymaniak Ł, Wisniewski S, Woźniak K, Frankowski M. Evaluation of pollutant emissions from a railbus in real operating conditions during transport work. *Combustion Engines* 2023;194:84–8. <https://doi.org/10.19206/CE-169138>.
- [97]Kim Y-K, Lee J-Y, Rhee Y, Chun Y-Y. Country-specific greenhouse gas emission factors of diesel-electric locomotive in Korea. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2017;57:74–83. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.009>.

- [98] Falendysh A, Kharlamov P, Kletska O, Volodarets N. Calculation of the Parameters of Hybrid Shunting Locomotive. *Transportation Research Procedia* 2016;14:665–71. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.325>.
- [99] Kortas P, Kropiwnicki J. Analysis of locomotive engine operating conditions during idling. *Combustion Engines* 2013;275–82.
- [100] Andrzejewski M, Daszkiewicz P, Czerwiński J, Merkisz-Guranowska A. Shunting locomotive energy consumption assessment during modernization works on the 354 railway line. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe* 2018;2018:1–6. <https://doi.org/10.53502/RAIL-138479>.
- [101] Change Energy Services Inc. on behalf of the Project Team. Assessment of the Design, Deployment Characteristics and Requirements of a Hydrogen Fuel Cell Powered Switcher Locomotive. Report of the Phase I Work Plan. Environment & Climate Change Canada – Contract No. 30000704788. 2020.
- [102] Szymlet N, Kamińska M, Ziółkowski A, Sobczak J. Analysis of Non-Road Mobile Machinery Homologation Standards in Relation to Actual Exhaust Emissions. *Energies* 2024;17:3624. <https://doi.org/10.3390/en17153624>.
- [103] Daszkiewicz P, Andrzejewski M, Urbański P, Woch A, Stefańska N. Analysis of the Exhaust Emissions of Toxic Compounds from a Special Purpose Rail Machine PLT-500 During Profiling the Ballast Cess. *Journal of Ecological Engineering* 2021;22:80–8.
- [104] Hedrick JC, Fritz SG. Locomotive Idle and Start-Up Exhaust Emissions Testing, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection; 2009, p. 385–94. <https://doi.org/10.1115/ICES2008-1627>.
- [105] Grzywna M. Evaluation of the reliability of a heavy diesel locomotive. *Combustion Engines* 2025. <https://doi.org/10.19206/CE-205974>.
- [106] Roberts A, Brooks R, Shipway P. Internal combustion engine cold-start efficiency: A review of the problem, causes and potential solutions. *Energy Conversion and Management* 2014;82:327–50. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.002>.
- [107] Lingaitis LP, Mjamlin S, Baranovsky D, Jastremskas V. Experimental investigations on operational reliability of diesel locomotives engines. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012;14:6–11.
- [108] Sobczak J, Kamińska M, Ziółkowski A, Rymaniak Ł, Szymlet N. Analysis of pollutant emissions of a railbus based on Real Train Emissions measurements. *Combustion Engines* 2025;201:22–33. <https://doi.org/10.19206/CE-201217>.
- [109] Goolak S, Kostenko I, Keršys R, Riabov I, Demydov O. Analysis of operation modes of shunting diesel locomotives when performing shunting work. *Transport Systems and Technologies* 2023;8–23. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-1>.
- [110] Kałuża A. General statistics of diesel engines' idle time: Shunting locomotives in industrial sidings in Poland 2009...2013. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2016;49:82–93. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.031>.
- [111] Kałuża A, Kucharski R. Locomotive diesel engine idle time distributions: Case studies from Poland, 2009–2013. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2018;62:524–35. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.02.019>.
- [112] Kortas P, Kropiwnicki J. A proposal of a description of the operating conditions of diesel-electric locomotives. *Combustion Engines* 2013;155:56–65. <https://doi.org/10.19206/CE-116977>.
- [113] Rymaniak L, Daszkiewicz P, Merkisz J, Bolzhelarskyi YV. Method of determining the locomotive engine specific fuel consumption based on its operating conditions. *AIP Conference Proceedings* 2019;2078:020053. <https://doi.org/10.1063/1.5092056>.
- [114] Frey HC, Rastogi N. Evaluation of Locomotive Emission Reduction Strategies. North Carolina State University. Dept. of Civil, Construction; 2018.
- [115] Graver BM, Frey HC. Comparison of Over-the-Rail and Rail Yard Measurements of Diesel Locomotives. ACS Publications 2015. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02497>.
- [116] Frey HC, Graver BM, North Carolina State University. Department of Civil C and Environmental Engineering. Measurement and evaluation of fuels and technologies for passenger rail service in North Carolina. 2012.

- [117] Graver BM, Frey HC. Highway Vehicle Emissions Avoided by Diesel Passenger Rail Service Based on Real-World Data. *Urban Rail Transit* 2016;2:153–71. <https://doi.org/10.1007/s40864-016-0044-y>.
- [118] Rymaniak Ł, Sobczak J, Szymlet N, Pielecha P, Wiśniewski S. Emission testing of diesel multiple units complying with different emission standards during real operating conditions. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe* 2025;2024:44–53. <https://doi.org/10.53502/RAIL-202044>.
- [119] Vojtisek-Lom M, Jirků J, Pechout M. Real-World Exhaust Emissions of Diesel Locomotives and Motorized Railcars during Scheduled Passenger Train Runs on Czech Railroads. *Atmosphere* 2020;11:582. <https://doi.org/10.3390/atmos11060582>.
- [120] Kamińska M, Kołodziejek D, Szymlet N, Fuć P, Grzeszczyk R. Measurement of rail vehicles exhaust emissions. *Combustion Engines* 2022;189:10–7. <https://doi.org/10.19206/CE-142526>.
- [121] Kim M-K, Park D, Kim M, Heo J, Park S, Chong H. A Study on Characteristic Emission Factors of Exhaust Gas from Diesel Locomotives. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2020;17:3788. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113788>.
- [122] Merkisz J, Lijewski P, Fuc P, Siedlecki M, Ziolkowski A. Development of the methodology of exhaust emissions measurement under RDE (Real Driving Emissions) conditions for non-road mobile machinery (NRMM) vehicles. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng* 2016;148:012077. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/148/1/012077>.
- [123] Merkisz J, Siedlecki M. Specific emissions analysis for a combustion engine in dynamometer operation in relation to the thermal state of the exhaust gas aftertreatment systems in a modified NRSC test. *MATEC Web Conf* 2017;118:00027. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711800027>.
- [124] AVL. AVL Micro Soot Sensor - AVL exhaust conditioning unit operating manual 2013.
- [125] Shi J, Chen F, Cai Y, Fan S, Cai J, Chen R, et al. Validation of a light-scattering PM2.5 sensor monitor based on the long-term gravimetric measurements in field tests. *PLOS ONE* 2017;12:e0185700. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185700>.
- [126] AxionRS+. GlobalMRV Inc. Introducing the world's first Micro PEMS with remote monitoring capabilities, Cheektowaga 2017 n.d.
- [127] Engine Exhaust Particle Sizer (EEPS) 3090 n.d. <https://www.tsi.com>.
- [128] Sensors Inc. SEMTECH EFM-HS High Speed Exhaust Flow Meter User Manual 2010.
- [129] Radziszewski P, Cierniewski M, Stachowiak D. Analiza przepływu energii w pojeździe szynowym zasilanym wodorowym ogniwem paliwowym. *Electrotechnical Review* 2025;1:285–9. <https://doi.org/10.15199/48.2025.01.60>.
- [130] Cierniewski M, Radziszewski P. Koncepcja remotoryzacji pomocniczego pojazdu szynowego z wykorzystaniem napędu elektrycznego. *Electrotechnical Review* 2025;101:276–80. <https://doi.org/10.15199/48.2025.01.59>.
- [131] Bryk K, Urbański P, Gallas D, Tarnawski P, Michalak P, Stobnicki P. Simulation Analysis of an Electric Multiple Unit Vehicle Energy Consumption, 2022, p. 2022-01–1133. <https://doi.org/10.4271/2022-01-1133>.
- [132] Ergun S. Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress* 1952;48:89.
- [133] Ansys, Inc. Materiały firmy Ansys n.d. <https://ansyshelp.ansys.com>.
- [134] Stamatellou A-M, Stamatelos A. Overview of Diesel particulate filter systems sizing approaches. *Applied Thermal Engineering* 2017;121:537–46. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.096>.