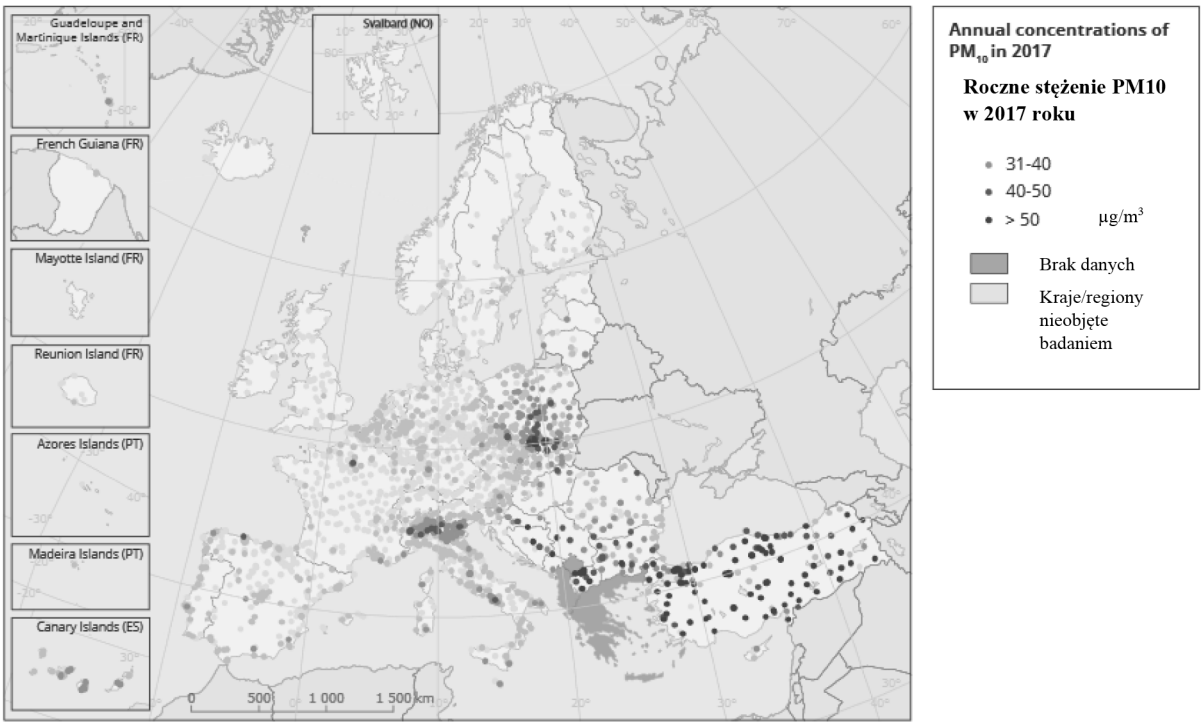
Rysunek 2
Roczne st enie PM10 w Europie w 2017 r.



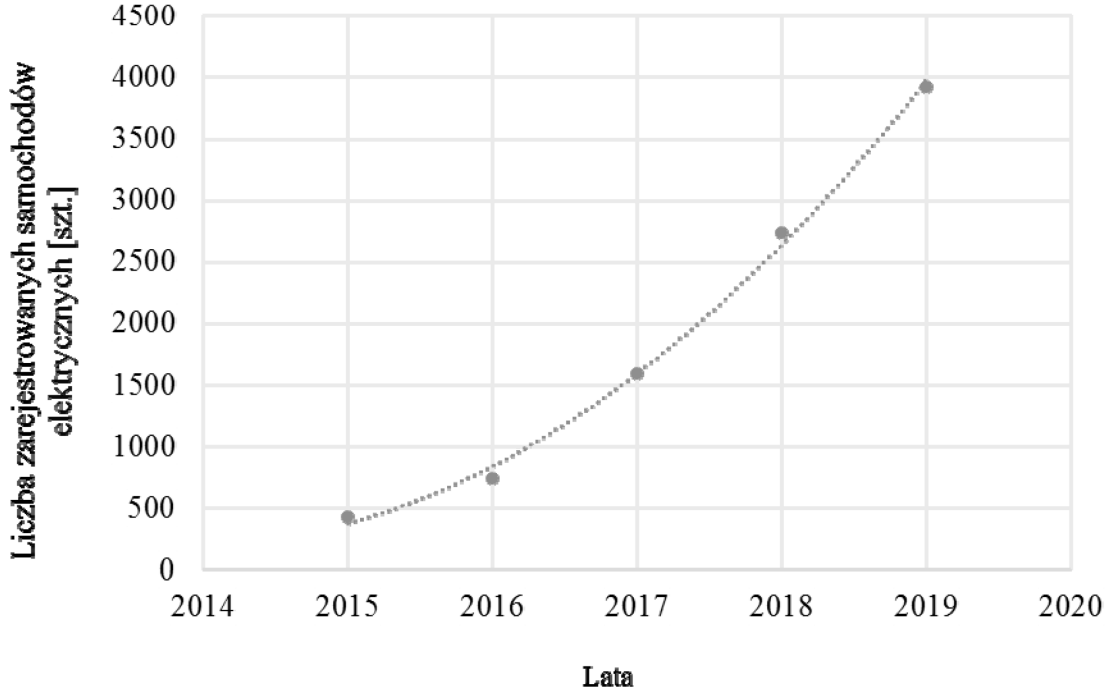
ród›o: European Environment Agency, 2019.

Rysunek 3
Typy nap dów wykorzystuj cych nap d elektryczny: a „ EV; b „ PHEV; c „ E-REV

ród›o: https://electricmobility.expert/czym-jest-samochod-elektryczny/ (14.12.2019).

Silnik elektryczny w porównaniu z silnikiem wewn trznego spalania, cechuje si lepsz wydajno ci , brakiem bezpo redniej emisji zanieczyszcze , mniejsz awaryjno ci uk›adu nap dowego, pozwala szybciej uzyska moc maksymaln oraz generuje mniej ha›asu podczas ruchu. Brak ha›asu odbierany jest przez opini publiczn dwojako, z jednej strony jako dodatkowy komfort podczas jazdy, a z drugiej jako ród›o

Rysunek 4
Liczba zarejestrowanych samochodów elektrycznych EV w Polsce w latach 2015…2019 [szt.]



ród›o: Polskie Stowarzyszenie Paliw Alternatywnych (2019). Licznik elektromobilno ci: 6 tys. EV w Polsce, http://pspa.com.pl (13 .12.2019).

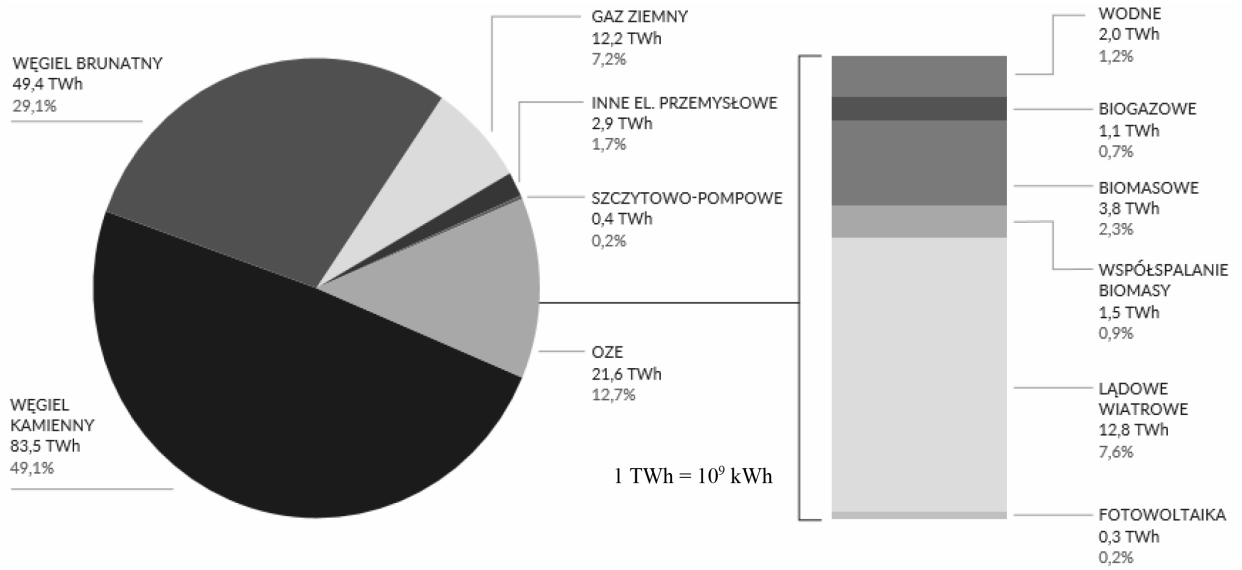
dodatkowego zagro enia wypadkiem, zw›aszcza podczas poruszania si po mie cie. Negatywnym aspektem u ytkowania pojazdów elektrycznych jest problem tworzenia cz stek sta›ych, powstaj cych podczas cierania si tarcz hamulcowych lub opon, lecz zjawisko to ma znacznie mniejsz skal ni w przypadku aut z silnikami wewn trznego spalania (Merkisz, Pielecha, 2014). Zauwa alnymi ograniczeniami s równie obecnie znacznie mniejszy zasi g wi kszo ci samochodów elektrycznych oraz mocno ograniczona liczba punktów ich ›adowania.

U ytkowanie samochodów z nap dem elektrycznym jest zgodne z wieloma za›o eniami zrównowaonego rozwoju. Wed›ug raportu Europejskiej Agencji rodowiska (EEA) z 2018 r., dotycz cego mechanizmu sprawozdawczego w zakresie transportu i rodowiska (TERM), samochody elektryczne mog okaza si wa nym narz dziem do walki ze zmianami klimatycznymi, jak równie z zanieczyszczeniem powietrza, którego jako stale si pogarsza. Przedstawione w raporcie wyniki bada pokazuj , e pomimo negatywnego wp›ywu na rodowisko, jaki generuj procesy wydobywcze materia›ów oraz procesy produkcyjne samochodów z nap dem elektrycznym, najwi kszy udzia› w ogólnie generowanym zanieczyszczeniu ma emisja powodowana u ytkowaniem pojazdów z silnikiem wewn trznego spalania (European Environment Agency, 2018).

Emisja zanieczyszcze przez samochody z silnikami wewn trznego spalania zale y g›ównie od zu- ycia paliwa oraz stosowanych technik jego ograniczania. Powszechnie wykorzystuje si katalizatory, recyrkulacj gor cych spalin, uk›ady spr ania powietrza czy filtry cz stek sta›ych (DPF) w silnikach Diesla, a w przypadku samochodów nap dzanych benzyn odpowiednio dostosowane filtry GPF. Niezale nie od stosowanych rozwi za nie jest mo liwe ca›kowite unikni cie emisji zanieczyszcze przez samochody z silnikami wewn trznego spalania. Pozwalaj one jednak zredukowa i relatywnie ustabilizowa poziom bezpo redniej emisji zanieczyszcze w ca›ym okresie u ytkowania auta. W przypadku samochodów elektrycznych brak jest bezpo redniej emisji zanieczyszcze , niemniej mog one wp›ywa na generowanie emisji po redniej, zwi zanej ze ród›em wytworzenia energii elektrycznej. W Polsce produkcja energii elektrycznej jest ma›o zró nicowana i oparta g›ównie na w glu (rysunek 5). W takiej sytuacji w przypadku samochodów elektrycznych zmienia si jedynie miejsce emisji szkodliwych zwi zków.

W przesz›o ci podejmowano wiele prac badawczych maj cych na celu analiz rzeczywist emisji dwutlenku w gla, wynikaj c z u ytkowania samochodów z nap dem elektrycznym, w zale no ci od krajowego udzia›u poszczególnych ród› w produkcji energii elektrycznej. Williams (2012), prze-

Rysunek 5
Udzia› poszczególnych ród› w produkcji energii elektrycznej w Polsce w 2018 r.



ród›o: Macuk i in., 2019.

prowadzi› studium przypadku dla 15 krajów i wyka-za›, e pojazdy elektryczne mog mie bardziej szkodliwy wp›yw na rodowisko ni samochody z silnikami wewn trznego spalania. Podobne wnio-ski przedstawili Pan i in. (2011), analizuj c miks energetyczny Szwecji, Chin, Francji oraz Stanów Zjednoczonych, oraz Kurien i Srivastava (2020) dla indyjskiego studium przypadku.

Celem artyku›u jest analiza poziomu po redniej emisji dwutlenku w gla generowanej przez pojazdy elektryczne w zale no ci od ród›a pochodzenia energii elektrycznej, wykorzystywanej do ich ›ado-wania oraz porównanie otrzymanych wyników z po-ziomem emisji zanieczyszcze , powstaj cych pod-czas u ytkowania pojazdów z silnikiem wewn trznego spalania.

Metodyka badawcza

Za›o enia koncepcyjne

W celu dokonania analizy poziomu po redniej emi-sji dwutlenku w gla pojazdów elektrycznych oraz po-równania wyników z emisj CO_2 generowan przez sa-mochody z silnikami wewn trznego spalania poczy-niono nast puj ce za›o enia:

- „ przyj to dane techniczne dla samochodów marki Volkswagen o zbli onej mocy silnika (tabela 1);
- „ dzienny dystans pokonywany przez pojazd to 60 km;
- „ zu ycie paliwa przez silnik benzynowy „ 6,1 $dm^3 \cdot 100\ km^{-1}$;

Tabela 1
Dane techniczne analizowanych pojazdów

Parametry techniczne	Volkswagen e-Golf 100 kW	Volkswagen Golf IQ Drive 1.5 TSI ACT 110 kW	Volkswagen Golf IQ Drive 2.0 TDI 110 kW
Nap d	silnik elektryczny	silnik benzynowy	silnik Diesla
Moc silnika	136 KM	150 KM	150 KM
Masa w›asna	1615 kg	1335 kg	1415 kg
Moment obrotowy	290 Nm	250 Nm	340 Nm

ród›o: https://www.volkswagen.pl (10.12.2019).

- zu ycie paliwa przez silnik Diesla „ 5,2 dm ^{3}·100 km^{-1};
- zu ycie energii przez silnik elektryczny „ 15,3 kWh·100 km^{-1};
- pod uwag brane s tylko emisje bezpo rednie generowane przez u ytkowane pojazdy.

Obliczenie dziennej emisji CO_2

Dobow warto emisji dwutlenku w gla do atmosfery, generowanej przez u ytkowanie samochodów obliczono wed›ug równania:

$$E_{CO_2} = E_{KAT-CO2} \cdot L \ , \qquad (1)$$

gdzie:

E_{CO_2} „ dobowa emisja dwutlenku w gla do atmosfery, generowana przez u ytkowanie samochodów [kg·doba^{-1}];

E_{KAT-CO_2} „ katalogowa warto emisji dwutlenku w gla do atmosfery (tabela 2) [kg·km^{-1}];

L „ dobowy dystans pokonywany przez u ytkowany samochód (dla trybu miejskiego przyj to L = 60 km·doba^{-1}) [km·doba^{-1}].

Wielko emisji dwutlenku w gla do atmosfery, powsta›ej w wyniku ›adowania akumulatora samochodu z nap dem elektrycznym, w zale no ci od rodzaju spalanego paliwa, obliczono na podstawie opracowanych przez Krajowy O rodek Bilansowania i Zarz dzania Emisjami (KOBiZE) wska ników emisyjno ci dla energii elektrycznej, pochodz cych z instalacji spalania, wed›ug równania (Urz d Regulacji Energetyki, 2019):

$$E_{P-CO2} = 360 \cdot \frac{We_{CO2}}{\eta}, \qquad (2)$$

gdzie:

E_{P-CO_2} „ emisja dwutlenku w gla dla danego paliwa [kg·MWh^{-1}];

We_{CO_2} „ wska nik emisyjno ci dwutlenku w gla dla danego paliwa (tabela 3) [kg·GJ^{-1}];

η „ sprawno wytwarzania energii elektrycznej w danej instalacji spalania (tabela 3) [%].

Ilo energii zu ytej podczas jednego dnia pracy samochodu elektrycznego wyliczono, korzystaj c z równania:

$$E = L \cdot E_{KAT-EN_EL} \ , \qquad (3)$$

gdzie:

E „ ilo energii zu yta podczas jednego dnia pracy samochodu elektrycznego [kWh];

E_{KAT-EN_EL} „ katalogowa warto zu ycia energii elektrycznej przez silnik elektryczny (przyj to E_{KAT-EN_EL} = 15,3 kWh·100 km^{-1}) [kWh·100 km^{-1}].

Tabela 2

Katalogowe warto ci bezpo redniej emisji dwutlenku w gla do atmosfery badanych pojazdów

Parametr	Volkswagen e-Golf 100 kW	Volkswagen Golf IQ Drive 1.5 TSI ACT 110 kW	Volkswagen Golf IQ Drive 2.0 TDI 110 kW
NEmisja CO_2 [g·km^{-1}]	0	142	134

ród›o: jak w tabeli 1.

Tabela 3

Wska nik $WeCO_2$ oraz sprawno elektrowni w zale no ci od rodzaju spalanego paliwa

Paliwo	Wskaźnik We_{CO_2} [kg CO_2·GJ^{-1}]	Sprawność elektrowni [%]
W giel kamienny	95,48	44,20
W giel brunatny	110,76	41,80
Gaz ziemny	56,10	52,50
Oleje (ON, OP)	74,10	44,20

ród›o: jak w tabeli 1.

Dobow wielko emisji dwutlenku w gla do atmosfery podczas jednego dnia pracy samochodu elektrycznego obliczono wed›ug wzoru:

$$M_{CO2} = E \cdot \sum K_i \cdot E_{P-CO2}, \quad (4)$$

gdzie:

M_{CO_2} „ ilo dwutlenku w gla wyemitowana podczas jednego dnia pracy samochodu elektrycznego [g];

K_i „ udzia› danego paliwa w produkcji energii elektrycznej [%].

Wyniki i dyskusja

W pracy wyznaczono dzienn emisj dwutlenku w gla do atmosfery, generowan przez u ytkowanie samochodów z nap dem elektrycznym oraz samochodów z silnikami wewn trznego spalania (rysunek 6). Ze wzgl du na ograniczon liczb samochodów z nap dem elektrycznym na rynku i brak odpowiedników nap dów spalinowych, porównano silniki o zbli onej mocy maksymalnej.

Najwy sz emisj dwutlenku w gla spo ród badanych pojazdów cechuje si samochód z silnikiem benzynowym „ emisja ta kszta›tuje si na poziomie 8520 g $CO_2 \cdot doba^{-1}$. W przypadku samochodu z silnikiem Diesla emisja jest niewiele ni sza i wynosi 8040 g $CO_2 \cdot doba^{-1}$. U ytkowanie samochodu z nap dem elektrycznym nie generuje bezpo redniej emisji dwutlenku w gla do atmosfery.

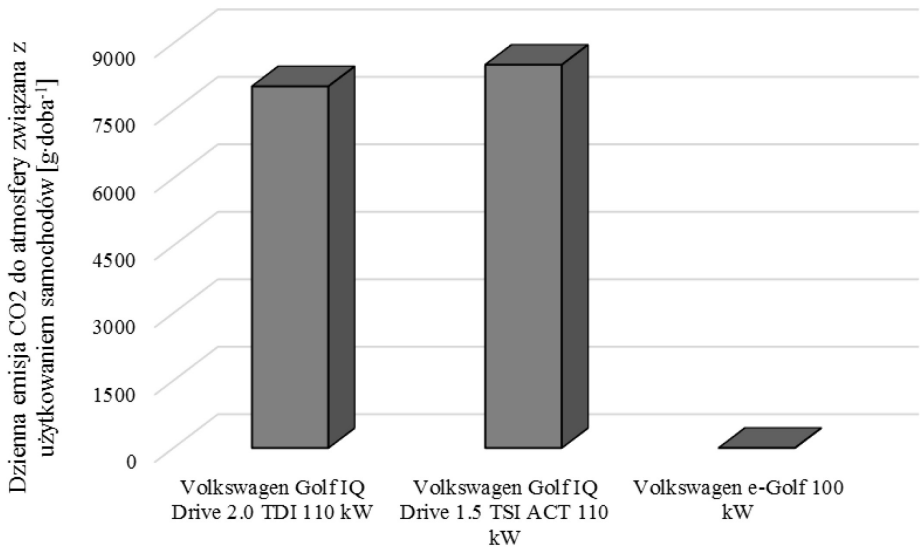
Jednak w przypadku samochodów z nap dem elektrycznym, pomimo i nie generuj one emisji bezpo redniej, nale y uwzgl dni po redni emisj dwutlenku w gla, zwi zan ze ród›em wytworzenia energii elektrycznej. W zale no ci od stosowanego paliwa lub ród›a energii emisja ta cechuje si du ym zró nicowaniem (rysunek 7).

Przyjmuj c dane zestawione w tabeli 3, mo emy stwierdzi , e zdecydowanie najwi ksza emisja przypada na elektrownie w glowe. Je li energia do zasilania akumulatora samochodu z nap dem elektrycznym pochodzi›aby ze spalania w gla brunatnego, emisja dwutlenku w gla wynosi›aby 953,9 g $CO_2 \cdot kWh^{-1}$, za w gla kamiennego „ odpowiednio 777,6 g $CO_2 \cdot kWh^{-1}$. Wynik ten jest bardzo zbli ony do emisji dla przedstawionego na rysunku 4 polskiego miksu energetycznego (778 g $CO_2 \cdot kWh^{-1}$). Mniejsz emisj cechuj si elektrownie zasilane gazem ziemnym (384,7 g $CO_2 \cdot kWh^{-1}$) oraz olejami (603,5 g $CO_2 \cdot kWh^{-1}$). Najkorzystniejsze z punktu widzenia rodowiskowego by›oby ›adowanie samochodu elektrycznego energi pochodz c z odnawialnych ród› energii, które nie wytwarzaj emisji bezpo redniej.

W zale no ci od ród›a pochodzenia energii elektrycznej samochód z nap dem elektrycznym mo e cechowa si mniejsz lub wi ksz emisj dwutlenku w gla do atmosfery w porównaniu z samochodami z silnikami wewn trznego spalania (rysunek 8). Najgorzej sytuacja kszta›tuje si , gdy akumulator samochodu z nap dem elektrycznym zasilany jest energi elektryczn pochodz c z elektrowni opalanych w glem brunatnym, które maj w Polsce prawie 30-procentowy udzia› w produkcji energii elektrycznej. W tym przypadku dobowa ilo emisji dwutlenku w -

Rysunek 6

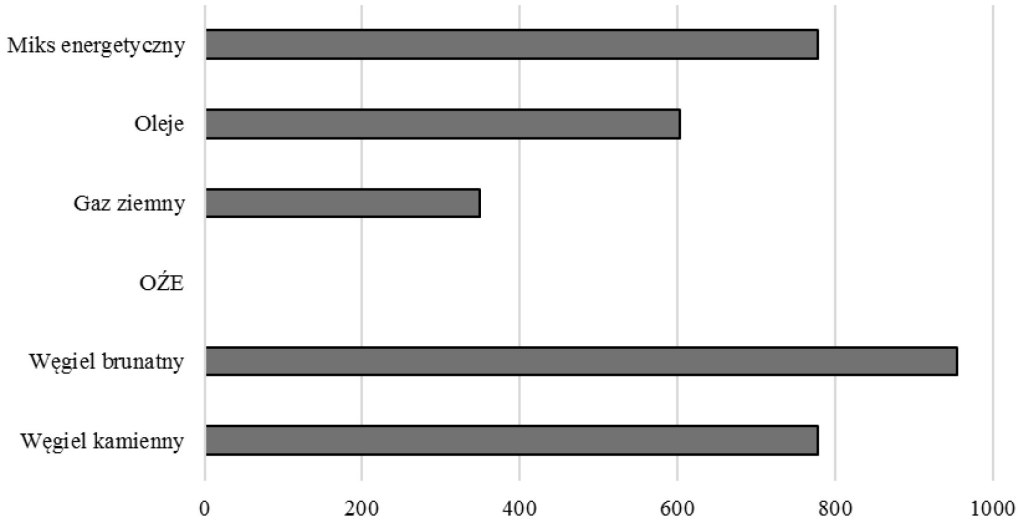
Dzienna emisja CO_2 do atmosfery zwi zana z u ytkowaniem samochodu w mie cie



ród›o: opracowanie w›asne.

Rysunek 7

Emisja dwutlenku w gla w zale no ci od ród›a energii elektrycznej [g·kWh ⁻¹]



ród›o: opracowanie w›asne.

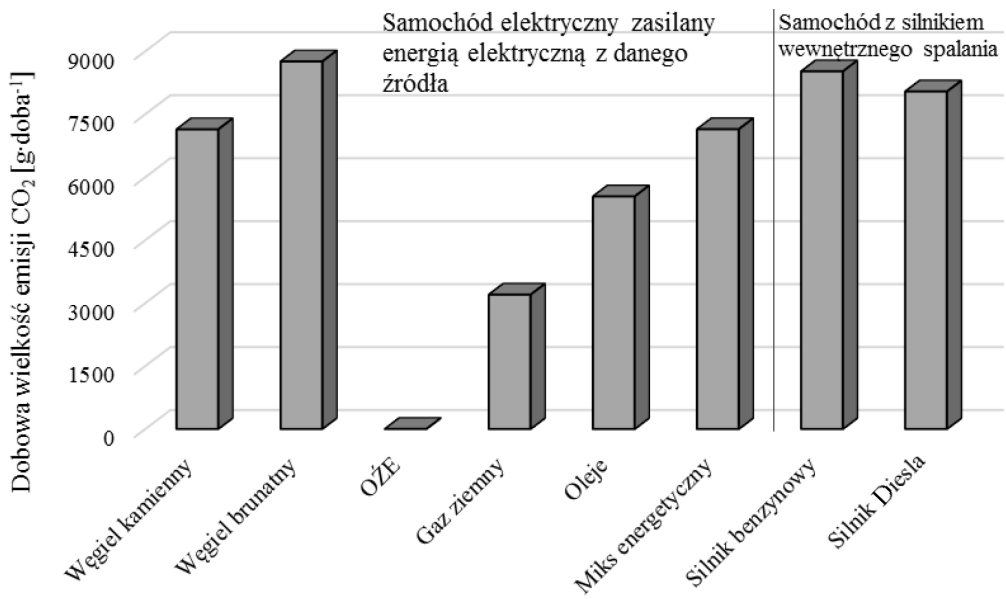
gla do atmosfery jest wi ksza o 716 g CO_2 w porównaniu z samochodem z silnikiem Diesla oraz o 236 g CO_2 w porównaniu z silnikiem benzynowym. W przypadku pozosta›ych badanych róde› energii emisja dla samochodów z nap dem elektrycznym jest ni sza ni dla samochodów z silnikiem wewn trznego spalania.

Bior c pod uwag wska niki emisyjno ci dla ko - cowych odbiorców energii elektrycznej w Polsce, a tak e oko›o o mioletni cykl ycia akumulatorów [2] produkowanych dla samochodów elektrycznych, s one w stanie wymiernie ograniczy emisj dwutlenku w gla do atmosfery w sektorze transportu. Podczas tego okresu, przy za›o onym dobowym dystansie L = = 60 km·doba⁻¹ pojedynczy samochód z nap dem elektrycznym wygeneruje o 689,12 kg CO_2 mniej ni samochód z silnikiem benzynowym oraz o 2090 kg CO_2 mniej ni samochód z silnikiem Diesla, co stanowi wymierny efekt rodowiskowy.

Ze wzgl du na prognozowany wzrost udzia›u odnawialnych róde› energii w produkcji energii elektrycznej w Polsce, podyktowanej zmian polityki energetycznej Polski do 2040 r. (Ministerstwo Ener-

Rysunek 8

Porównanie bezpo redniej dobowej emisji dwutlenku w gla do atmosfery przez samochód elektryczny i samochód z silnikiem wewn trznego spalania



ród›o: opracowanie w›asne.

gii, 2019) emisja po rednia zwi zana z ›adowaniem akumulatorów samochodów z nap dem elektrycznym b dzie ulega stopniowemu zmniejszeniu.

Wnioski

Przy porównywaniu emisji zwi zanej z u ytkowaniem samochodów z silnikiem wewn trznego spalania z emisj po redni pojazdu elektrycznego, zwi - zan ze ród›em wytworzenia energii elektrycznej mo na zauwa y , i przy obecnym udziale poszczególnych róde› w produkcji energii elektrycznej w Polsce, silniki z nap dem elektrycznym s niewiele mniej szkodliwe od silników z nap dem benzynowym oraz Diesla. Najbardziej ekologicznym rozwi zaniem jest ›adowanie pojazdów energi wytwarzan ze ró- de› odnawialnych, dla których emisja bezpo rednia jest zerowa. W ród paliw kopalnych umiarkowan emisj CO_2 podczas produkcji energii elektrycznej charakteryzuje si gaz ziemny.

Wzrost udzia›u odnawialnych ró›de› energii w produkcji energii elektrycznej b dzie pozytywnie wp›ywa› na zmniejszenie poziomu po redniej emisji dwutlenku w gla generowanej przez ›adowanie akumulatorów pojazdów elektrycznych. Nale y jednak pami - ta , e wraz ze wzrostem liczby takich samochodów, zapotrzebowanie na energi elektryczn wzro nie, co mo e stwarza kolejne problemy dla polskiej energetyki zawodowej i sieci elektroenergetycznej.

Zamiana samochodu z silnikiem wewn trznego spalania na elektryczny nie zapewnia zerowej emisji zanieczyszcze . Rozwi zuje jedynie problem du ej kumulacji zanieczyszcze , odczuwalnej najbardziej w du ych miastach, poprawiaj c lokalnie jako po- wietrza oraz zmniejszaj c poziom ha›asu, co niew t- pliwie wp›ywa na popraw komfortu i jako ci ycia ich mieszka ców.

Przypisy/Notes

[1] Na podstawie: https://www.eea.europa.eu/pl/articles/pojazdy-elektryczne-madry-wybor-dla-srodowiska#tab-zobacz-r%C3%B3wnie%C5%BC (15.12.2019).

[2] https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_1003a_battery_aging_in_an_electric_vehicle_ev (08.08.2020).

Bibliografia/References

Literatura/Literature

European Environment Agency (2018). Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives. EEA Report No. 13/2018 , 6…7, 57…68.

European Environment Agency (2019). Air quality in Europe „ 2019 report. *EEA Report* No 10/2019.

G›ówny Urz d Statystyczny (2019). *Transport — Wyniki działalności w 2018 roku*, Warszawa.

Kurien, C., Srivastava, A. K. (2020). Impact of Electric Vehicles on Indirect Carbon Emissions and the Role of Engine Posttreat ment Emission Control Strategies. *Integrated Environmental Assessment and Management*, *16*(2), 234…244. https://doi.org/10.1002/ieam.4206

•osiewicz, Z., Sendek-Matysiak, E., (2018). Rozwój elektromobilno ci „ w aspekcie eksploatacji samochodów z nap dem elektrycznym, Autobusy. *Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe* (12), 126…128. https://doi.org/10.24136/atest.2018.368

Macuk, R., Ma kowiak-Pandera, J., Rubczy ski, A., Gawlikowska-Fyk, A. (2019). *Transformacja energetyczna w Polsce* | Edycja 2019.

Merkisz, J., Pielecha, J. (2014).*Emisja cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych.* Pozna : Wydawnictwo Politechniki Pozna skiej.

Merkisz-Guranowska, A., Pielecha, J. (2014). *Emisja zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych, a parametry ruchu drogowego*. Warszawa…Pozna : Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

Ministerstwo Energii (2019). Polityka Energetyczna Polski do 2040 r., Warszawa.

Pan, Y., Zhang, Y., Zhang, Z., Cao, Q. (2011). *Striving for Synthetic Benefits: Is Your Country Suitable for the Widespread Use of Electric Vehicles*. International Conference on Management and Service Science, Wuhan, 12…14.08.2011. https://doi.org/10.1109/icmss.2011.5998108

Polskie Stowarzyszenie Paliw Alternatywnych (2019). *Licznik elektromobilności: 6 tys. EV w Polsce*, http://pspa.com.pl (13.12.2019)

Roman, K., (2017). Ocena funkcjonowania transportu miejskiego w policentrycznych o rodkach metropolitarnych na przyk›adzie trójm ia- sta. *Studia Miejskie*, *27*, 51…65. https://doi.org/10.25167/sm2017.027.04

Urz d Regulacji Energetyki (2019). Informacja Prezesa Urz du Regulacji Energetyki Nr 34 /2017 w sprawie zasad ustalania poziomu emi- syjno ci CO_2 na potrzeby aukcyjnego systemu wsparcia, o którym mowa przepisach ustawy o odnawialnych ród›ach energii, Warszawa.

Williams, A. R. (2012). Electricity, Mobility and the Neglected Indirect Emissions. In: O. Inderwildi, D. King (eds.), *Energy, Transport, & the Environment, Addressing the Sustainable Mobility Paradigm*, 115…134. London: Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2717-8_7

Strony internetowe/Web sites

https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_1003a_battery_aging_in_an_electric_vehicle_ev (08.08.2020)

https://electricmobility.expert/czym-jest-samochod-elektryczny/ (14.12.2019)

https://www.eea.europa.eu/pl/articles/pojazdy-elektryczne-madry-wybor-dla-srodowiska#tab-zobacz-r%C3%B3wnie%C5%BC (15.12.2019)

https://www.volkswagen.pl (10.12.2019)

Dr hab. in . Arkadiusz Dyjakon

Absolwent Wydzia›u Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wroc›awskiej. Od 2010 r. zatrudniony na stanowisku adiunkta na Uniwersytecie Przyrodniczym we Wroc›awiu w Zak›adzie Niskoemisyjnych ród› Energii i Gospodarki Odpadami. Od 20 lat zajmuje si problematyk wytwarzania energii elektrycznej i ciep›a z paliw kopalnych i odnawialnych ród› energii.

•ukasz Sobol

Student trzeciego roku studiów in ynierskich, kierunku odnawialne ród›a energii i gospodarka odpadami na Wydziale Przyrodniczo-Technologicznym Uniwersytetu Przyrodniczego we Wroc›awiu, cz›onek Studenckiego Ko›a Naukowego SKN ŒBioEnergiaŽ.

Mateusz Strojek

Student trzeciego roku studiów in ynierskich, kierunku odnawialne ród›a energii i gospodarka odpadami na Wydziale Przyrodniczo-Technologicznym Uniwersytetu Przyrodniczego we Wroc›awiu. Cz›onek Studenckiego Ko›a Naukowego SKN ŒBioEnergiaŽ.

Dr hab. in . Arkadiusz Dyjakon

A graduate of the Faculty of Mechanical and Power Engineering at the Wroclaw University of Technology. From 2010, he is employed as an assistant professor at the Wroclaw University of Environmental and Life Sciences in the Department of Low-Emission Energy Sources and Waste Management. Since 20 years his scientific area of interest focused on the issues of generating electricity and heat from fossil fuels and renewable energy sources.

•ukasz Sobol

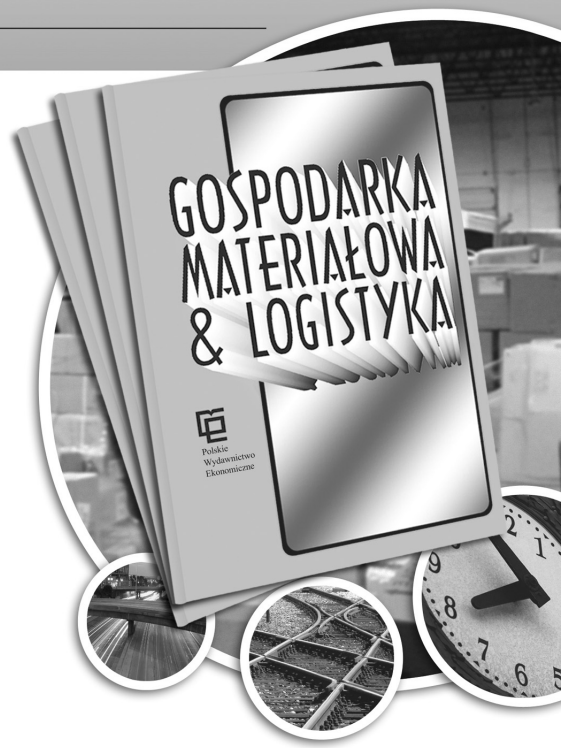
Third-year student of engineering studies at the The Faculty of Life Sciences and Technology of the Wroc›aw University of Environmental and Life Sciences in the field of Renewable Energy Sources and Waste Management. Member of the "Bioenergy" Student Research Circle.

Mateusz Strojek

Third-year student of engineering studies at the The Faculty of Life Sciences and Technology of the Wroc›aw University of Environmental and Life Sciences in the field of Renewable Energy Sources and Waste Management. Member of the "Bioenergy" Student Research Circle.

Material Economy and Logistics Journal
www.pwe.com.pl

Gospodarka Materiałowa i Logistyka
www.gmil.pl

ZNAJDZIESZ NAS TU

www.gmil.pl
tel. 795 155 583
ul. Podwale 17
00-252 Warszawa