



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**VODÍK VS. ELEKTŘINA - POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ
NÁROČNOSTI POHONŮ PRO EV VOZIDLA**

HYDROGEN VS. ELECTRICITY - COMPARISON OF ENERGY PERFORMANCE OF EV POWERTRAINS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kristián Šándor

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Kristián Šándor**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vodík vs. elektřina – porovnání energetické náročnosti pohonů pro EV vozidla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Problematika zdrojů a energetické náročnosti „výroby“ elektřiny či energetických nosičů pro pohon EV vozidle je velice aktuální problematikou v oblasti energetiky a dopravy. Stále není vyřešena otázka, jaké jsou celkové energetické náklady pro pohon EV vozidel a to především s pohledu celkové energetické náročnosti „výroby“ a efektivity celého distribučního řetězce pro dopravu energie pro pohon EV vozidel.

Cíle bakalářské práce:

Porovnat a kriticky zhodnotit energetickou náročnost provozu vozidla s pohonem na elektřinu a na vodík (automobil s palivovými články). Práce navazuje na bak. práci BOCHNÍČEK, O. Skutečná energetická náročnost plug-in hybridů a elektromobilů v závislosti na místě provozu vozidla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015.

Seznam doporučené literatury:

BOCHNÍČEK, O. Skutečná energetická náročnost plug-in hybridů a elektromobilů v závislosti na místě provozu vozidla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 70 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.

DESANTES, J. M., MOLINA, S., NOVELLA, R., LOPEZ-JUREZ, M. Comparative global warming impact and NOX emissions of conventional and hydrogen automotive propulsion systems. Energy Convers. Manag. 221, (2020).

YU, X., SANDHU, N. S., YANG, Z., ZHENG, M. Suitability of energy sources for automotive application – A review. Appl. Energy 271, (2020).

ZHANG, C., GREENBLATT, J. B., MACDOUGALL, P., SAXENA, S., JAYAM PRABHAKAR, A. Quantifying the benefits of electric vehicles on the future electricity grid in the midwestern United States. Appl. Energy 270, (2020).

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Téma znižovania emisií a zvyšovanie podielu výroby energie z obnoviteľných zdrojov je v roku 2021 veľmi aktuálna téma. Aj preto ma zaujalo spracovať túto bakalársku prácu s cieľom porovnať a kriticky zhodnotiť energetickú náročnosť prevádzky vozidla s pohonom na elektrinu (batériový elektromobil) a na vodík (elektromobil s palivovými článkami). Teoretická časť práce všeobecne opisuje spomínané pohony, ku ktorým je zahrnutý aj plug-in hybridný systém pohonu vozidla. Praktická časť práce je zameraná na výpočty emisnej a energetickej náročnosti pohonov pre rok 2021 a s racionálnym odhadom pre rok 2050. Pre výpočet emisnej a energetickej náročnosti pohonov je kľúčový spôsob výroby elektrickej energie a spôsob výroby vodíka. Na základe použitých parametrov vyplýva, že najnižšie energetické nároky na prevádzku dosahujú batériové elektromobily v krajinách s vysokým podielom výroby elektriny z obnoviteľných zdrojov energie. Naopak, ak je výroba elektrickej energie tvorená prevažne z fosílnych palív, je energeticky výhodnejšie prevádzkovať vodíkový automobil. Z výpočtov je zrejmé, že z pohľadu produkcie nepriamych emisií počas prevádzky a z pohľadu energetickej náročnosti, sú na tom najhoršie plug-in hybridné vozidlá a rozdiel medzi batériovými elektromobilmi a automobilmi na vodík, závisí na energetickom mixe konkrétnej krajiny. V závere práce sú taktiež zhodnotené výhody, nevýhody a technické výzvy posudzovaných druhov pohonov.

Kľúčové slová

elektromobil, vodík, palivový článok, energetická náročnosť, emisie

ABSTRACT

The topic of emission reduction and the increase in the share of energy produced from renewable sources remains actual and highly discussed in 2021. It was the major reason why I chose to compose this bachelor's thesis, in which I aim to critically evaluate and compare the energy performance of an electrical vehicle and a hydrogen vehicle. The theoretical part of the thesis outlines the aforementioned drivetrains as well as the plug-in hybrid drivetrain. The practical part of the thesis focuses on calculations of the energy performance of the drivetrains for the year 2021 with a rational estimate for 2050. The methods of electricity and hydrogen production are crucial for energy performance evaluation. Data shows that electric cars operated in countries with a high share of energy produced from renewable sources are the least energetically demanding. On the other hand, if the energy production depends predominantly on fossil fuels, it is more efficient to operate a hydrogen vehicle. Calculations show that when considering the indirect emissions during the operation as well as the energy performance, the plug-in hybrid vehicles are the least efficient. The difference in efficiency between electric and hydrogen vehicles varies depending on the mode of energy production of that specific country. The conclusion of this thesis also discusses advantages, disadvantages and technological challenges concerning the aforementioned drivetrains.

Keywords

electric vehicle, hydrogen, fuel cell, energy performance, emissions

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ŠÁNDOR, Kristián. *Vodík vs. elektřina - porovnání energetické náročnosti pohonů pro EV vozidla*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133050>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jan Fišer.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu na tému Vodík vs. elektrina – porovnanie energetickej náročnosti pohonov pre EV vozidlá vypracoval samostatne pod vedením Bc. Ing. Jana Fišera, Ph.D. , s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

Dátum

Kristián Šándor

POĎAKOVANIE

Za odborný prístup, cenné rady a venovaný čas ďakujem vedúcemu práce Bc. Ing. Janovi Fišerovi, Ph.D. a v poslednej rade ďakujem rodine za podporu počas štúdia.

OBSAH

1	Úvod.....	11
2	Batériové elektromobily.....	12
	2.1 Elektromobily	12
	2.2 História.....	13
	2.3 Princíp pohonu	14
	2.4 Prehľad modelov	14
3	Plug-in hybridné vozidlá.....	16
	3.1 Hybridný pohon	16
	3.2 História.....	16
	3.3 Princíp pohonu	17
	3.4 Prehľad modelov	17
4	Vodíkové automobily	19
	4.1 Vodíkové automobily	19
	4.2 História.....	19
	4.3 Výroba vodíka.....	20
	4.4 Princíp pohonu	20
	4.5 Prehľad modelov	22
5	Energetická a emisná náročnosť pohonov	24
	5.1 Energetický mix krajín	25
	5.2 Energetické straty pohonov.....	25
	5.3 Ekonomická náročnosť pohonov pre koncového zákazníka	26
	5.4 Efektivita výroby vodíka	27
	5.4.1 Účinnosť parnej reformácie	27
	5.4.2 Účinnosť elektrolýzy	27
	5.4.3 Množstvo vyprodukovaného CO ₂ pri výrobe vodíka	28
	5.5 Energetická náročnosť a emisie pri výrobe elektriny a vodíka	29
	5.6 Celková emisná náročnosť.....	30
	5.7 Celková energetická náročnosť.....	32
6	Grafické znázornenie a porovnanie výsledkov	34
	6.1 Porovnanie z pohľadu emisnej náročnosti.....	34
	6.1.1 Diskusia výsledkov emisnej náročnosti.....	35
	6.2 Porovnanie z pohľadu energetickej náročnosti.....	36
	6.2.1 Diskusia výsledkov energetickej náročnosti	37
7	Porovnanie pohonov a technické výzvy do budúcnosti	39
	7.1 Batériové elektromobily.....	39
	7.2 Plug-in hybridné vozidlá.....	40
	7.3 Vodíkové automobily	40
8	Záver.....	42
9	Zoznam použitých zdrojov.....	44
10	Zoznam použitých symbolov a skratiek	50
11	Zoznam obrázkov	53

12	Zoznam tabuliek	54
----	-----------------------	----

1 Úvod

Históriu ľudstva formovali štyri dôležité revolúcie. Pred 70 000 rokmi začala kognitívna revolúcia, nasledovala poľnohospodárska revolúcia, ktorá odštartovala pred 12 000 rokmi a potom tretia - vedecká revolúcia, začala približne pred 500 rokmi. Až okolo roku 1700 si ľudia uvedomili, že dlhé tisícročia boli svedkami výroby energie. Všimli si, že pri vare vody v zakrytom hrnci vzniká vodná para, ktorá dokáže pokrievku nadvihnúť. Stačilo vymeniť hrniec za nádobu, ktorá bola spojená s piestom. Princíp bol jednoduchý. Spálili palivo, napríklad uhlie, z ktorého získali teplo na ohrev vody v nádobe. Vzniknutá para sa rozpínala a tlačila na piest. Piest sa dal do pohybu a všetko, čo bolo s ním spojené sa hýbalo tiež. Takto vznikol najdôležitejší stroj priemyselnej revolúcie – parný stroj. Prvé parné stroje sa používali v Británii na odčerpávanie vody z uhoľných baní.^[1] Až koncom 18. storočia začali ľudia uvažovať nad zrýchlením ich mobility. Takto vznikli prvé automobily poháňané parným strojom. Netrvalo dlho a prišli efektívnejšie elektromobily a automobily s benzínovým, či naftovým motorom. Začiatkom 20. storočia sa vývoj spaľovacieho motora enormne zrýchlil a automobily sa zdokonaľovali taktiež. Avšak po celé storočie bol hlavným komponentom automobilu motor, ktorý spaľuje fosílnu palivú – obmedzený zdroj energie na zemi, ktorý znečisťuje životné prostredie oxidom uhličitým. Touto problematikou sa ľudstvo zaoberá posledné desaťročia. Európska únia nalieha na výrobcov automobilov znižovať emisie, zavádzaním Euro noriem. Tí, pod hrozbou vysokých pokút hľadajú alternatívy na zníženie emisií. Alternatívou automobilov s konvenčným spaľovacím motorom sú elektromobily, poháňané akumulátorom, ktorý je potrebné pred jazdou nabiť z vonkajšieho zdroja. Elektromobily pri jazde neprodukujú žiadne lokálne emisie, čím prispievajú k zlepšeniu klímy. Avšak je tu otázka či sú elektromobily naozaj ekologickejšie. Je dôležité, akým spôsobom sa elektrina, potrebná na pohyb, vyrába. Ďalšou alternatívou, ktorá môže zmeniť nepriaznivý ekologický dopad spaľovacích motorov sú automobily s vodíkovými článkami. Cieľom mojej bakalárskej práce bude objektívne zhodnotiť energetickú náročnosť elektrických a vodíkových automobilov. Do porovnávania zahrniem aj plug-in hybridné vozidlá, ktoré sú kombináciou spaľovacích motorov s malými elektromotormi.

2 Batériové elektromobily

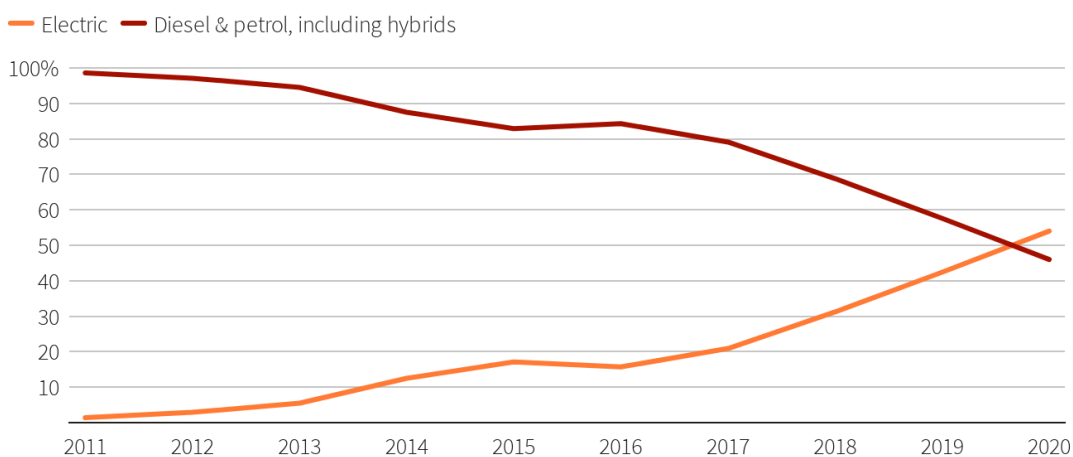
2.1 Elektromobily

Batériový elektromobil (BEV – battery electric vehicle) alebo elektrické vozidlo, je vozidlo disponujúce jedným alebo viacerými elektromotormi, ktoré transformujú elektrickú energiu uloženú v akumulátore na mechanickú prácu, ktorá je prenášaná na kolesá, čím je dosiahnutý pohyb vozidla. Akumulátor je potrebné pred jazdou dobiť z externého zdroja. Dojazd takéhoto vozidla závisí na kapacite spomínaného akumulátora, efektívite konkrétneho modelu, spôsobe jazdy a využívania klimatizácie alebo vykurovania kabíny. V čase písania bakalárskej práce sa priemerný dojazd elektrických vozidiel pohybuje okolo 350 kilometrov.^[2] Hlavnou výhodou oproti automobilom so spaľovacím motorom, je účinnosť prevodu elektrickej energie na mechanickú, ktorá dosahuje 90 % (v prípade asynchrónneho motora) oproti 25-30% (resp. 30-45%) účinnosti spaľovacieho motora.^[3] Ďalšími nezanedbateľnými výhodami elektrického vozidla (EV) je nulová produkcia skleníkových plynov počas jazdy, možnosť rekuperácie kinetickej energie z brzdenia späť do akumulátora alebo nízka hlučnosť vozidla. Najväčšími nevýhodami elektromobilov sú dojazd a čas potrebný na nabitie akumulátora.

V súčasnosti sú do elektromobility vkladané veľké peniaze a hlavne nádeje do „zelenšej“ budúcnosti. Príkladom toho je automobilová spoločnosť Ford, ktorá investuje 1 miliardu dolárov do transformácie továrne v Kolíne nad Rýnom na závod zameraný na výrobu a vývoj elektrických vozidiel. Ford deklaruje plne elektrifikovanú výrobu do roku 2030. Ďalším príkladom je Nórsko, ktoré chce od roku 2025 predávať čisto elektrické vozidlá. Tento míľnik je na dosah, čo dokazujú čísla predaných automobilov za rok 2020. Batériovým elektromobilom (BEV) patrí 54,3% podiel. Predalo sa viac elektrických vozidiel ako plug-in hybridov a automobilov so spaľovacím motorom dokopy.^[4]

Norway new car sales

Years 2011-2020, percentage of market



Source: Norwegian Road Federation (OFV)

Obr. 2.1 Predaj BEV, PHEV a vozidiel so spaľovacím motorom za rok 2020 v Nórsku.^[5]

2.2 História

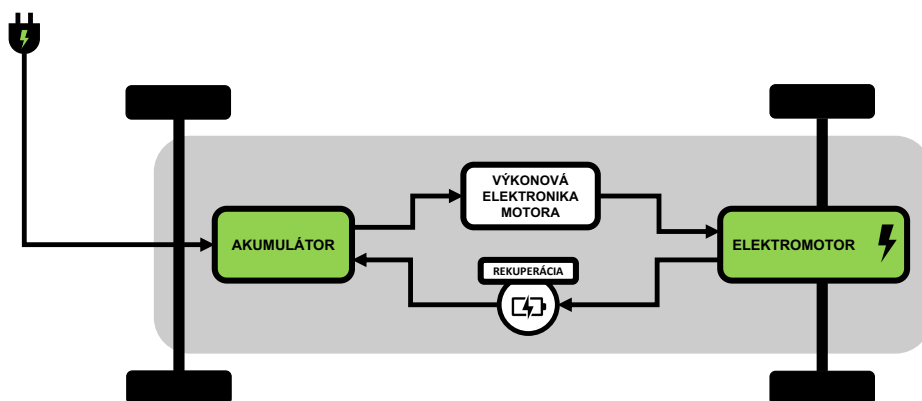
Prvé experimentálne elektrické automobily (EV – electric vehicle) sa objavili krátko po vynájdení elektromagnetizmu v roku 1820. Najvýznamnejšími menami tej doby boli Alessandro Volta, Georg Simon Ohm, Michael Faraday a iní. Na začiatku automobilovej éry boli elektromobily úspešnejšie ako automobily so spaľovacím motorom. Predchádzajúce parné stroje, známe zo železničných lokomotív, takisto neboli vhodné na konštrukciu ľahkých automobilov, kvôli ich veľkej hmotnosti a potrebe vody, ktorá bola potrebná na chod. Prelom EV priniesli vynálezy dobíjateľných batérií a efektívnejšieho elektromotora okolo roku 1870.^[6] Svoj vrchol elektromobily dosiahli na prelome 19. a 20. storočia, kedy im patrilo 38 % automobilového trhu (pozn. US trh). V porovnaní so 40% parných motorov a 22% spaľovacích motorov. Ich pokles sa datuje do druhej dekády minulého storočia, kedy došlo k výraznému vzostupu spaľovacieho motora, a to vďaka pokroku v oblasti infraštruktúry, výrobných technológií, zníženej ceny za ropu alebo úspešnému nahradeniu manuálnej kľuky elektrickým štartérom. K dominancii automobilov so spaľovacím motorom výrazne pomohol Henry Ford so svojou pásovou výrobou Modelu T, ktorý bol v tom čase trikrát lacnejší než elektrické automobily. Druhá éra elektromobility nastala na začiatku tohto tisícročia. Nepriaznivé ekologické vyhliadky do budúcnosti a vysoká cena za ropu motivovali ľudí po hľadaní “zelenšej” a lacnejšej cesty. Ako priekopníka v oblasti elektromobility môžeme považovať firmu Tesla Motors, ktorá v roku 2008 spustila výrobu modelu Roadster. V roku 2012 začala predávať Model S. Toto EV disponovalo dojazdom 372 kilometrov v najslabšej konfigurácii akumulátorov, v tej silnejšej takmer 500 kilometrov. Tým elektromobily eliminovali svoju najväčšiu slabosť, ktorou bol krátky dojazd. V júni 2020 spoločnosť Tesla oznámila, že Model S Long Range Plus má dojazd 647 kilometrov na jedno nabitie (podľa štandardu EPA).^[7]



Obr. 2.2 Dobový elektromobil navrhnutý Thomasom Parkerom, 1884.^[8]

2.3 Princíp pohonu

Pohon EV zabezpečuje elektromotor. Je to elektrické zariadenie konvertujúce elektrickú energiu do mechanickej, s účinnosťou väčšinou prevyšujúcou 90 %. Ako zdroj energie, potrebnej na pohyb, sa používa akumulátor zložený z chemických článkov, ktorý dokáže uchovávať elektrinu. V minulosti sa používali olovo-kyselinové a nikel-metal hydridové batérie s kapacitou potrebnou na dojazd neprevyšujúci 150 km. Pokrok prišiel s vynájdением lítium-iónových článkov koncom minulého storočia. Tie sú z pohľadu hmotnosti, energetickej hustoty a cyklovateľnosti omnoho efektívnejšie ako jej predchodcovia. Pohonná jednotka spolu s elektromotorom je umiestnená priamo na náprave vozidla. Prevodovka má väčšinou jeden pevný prevodový pomer, z toho dôvodu nie je potrebné používať spojku. Vo vozidle sa nachádza oveľa menej mechanických (pohyblivých) súčiastok, ktoré by sa mohli časom poškodiť. Konštrukčne je elektromobil oveľa jednoduchší ako konvenčný automobil so spaľovacím motorom. Elektromotor pracuje na princípe elektromagnetizmu. Skladá sa z dvoch častí – rotoru a statoru. Pracuje v dvoch režimoch – ako motor, ktorý využíva energiu z akumulátoru a ako generátor, ktorý pomáha prevádzať mechanickú energiu vznikajúcu pri brzdení späť na elektrickú energiu (tzv. rekuperačné brzdenie).^[6]



Obr. 2.3 Všeobecná schéma pohonu BEV.

2.4 Prehľad modelov

Trend posledných rokov poukazuje na dominantné zastúpenie SUV automobilov medzi predanými kusmi. V júni 2020 v Európe predaje SUV citeľne padli o 18 %, avšak podiel na trhu narástol na 40 %.^[9]

V kapitole 4.5 sú uvedené dva modely automobilov poháňaných vodíkom. Reprezentujú segment SUV a sedanu. V každej kapitole predstavím zástupcov týchto tried.



Obr. 2.4 Tesla Model 3.^[10]



Obr. 2.5 Škoda Enyaq iV.^[11]

Tab. 2.1 Základné informácie predstavených BEV.

	Tesla Model 3 Long Range	Škoda Enyaq iV 80
Výkon [kW]	202	150
Kapacita batérie [kWh]	75	82
Dojazd [km]	580	538
Spotreba [kWh/100 km]	16	18,4
Celková hmotnosť [kg]	1844	2658
Rozmery (d / š / v) [mm]	4694 / 1849 / 1443	4649 / 1879 / 1616
Cena [€] (rok 2021)	49 990	47 490

3 Plug-in hybridné vozidlá

3.1 Hybridný pohon

Plug-in hybridné vozidlá (PHEV – plug-in hybrid electric vehicle) reprezentujú reakciu automobilového priemyslu za cieľom zníženia znečistenia a spotreby fosílnych palív v doprave. Hybridné vozidlá využívajú typicky dva rôzne zdroje pohonu, a to tak, aby bola jazda čo najefektívnejšia. Zdroje sa počas jazdy striedajú alebo dopĺňajú, čo zabezpečuje riadiaca jednotka. Spravidla sú hybridné vozidlá vybavené spaľovacím motorom a elektromotorom. Ten v tomto prípade pomáha spaľovaciemu motoru pri určitých situáciách ako sú napríklad časté rozbíhanie v meste, prudká akcelerácia či mierne dobrzdovanie. Elektromotor dokáže pracovať obojstranne. Jednak ako motor, kedy prevádza elektrickú energiu z batérií na energiu mechanickú a naopak, ako generátor, čo bolo bližšie opísané v kapitole 2.3. Takéto vozidlo dokáže dobíjať akumulátor za jazdy. Existuje viacero druhov hybridných vozidiel, ktoré sa delia podľa schopnosti prevádzky elektromotora (či je elektromotor schopný samostatnej prevádzky, alebo len čiastočne dopomáha spaľovaciemu motoru), bližšie predstavené v kapitole 3.3.^[12]

Plug-in hybridné automobily sú vozidlá, ktorým sa akumulátor dokáže dobíjať zo zásuvky. Ich najväčšou výhodou oproti iným hybridom je to, že dokážu prejsť väčšiu vzdialenosť na čisto elektrický pohon. Dnes sa dojazd takýchto automobilov na elektrinu pohybuje v rozmedzí 40 až 60 kilometrov, čo v mnohých prípadoch postačuje na každodennú prevádzku vozidla v meste. Ich 59,4% nárast v roku 2020 na európskom trhu v počte predaných kusov oproti predchádzajúcemu roku dokazuje, že sú čoraz viac obľúbenejšie a vyhľadávanejšie.^[13] Avšak, nemôže sa zabudnúť na ich hlavnú podstatu. Sú to hybridné vozidlá, ktorých prevádzka je účinnejšia a efektívnejšia za určitých podmienok. Tou hlavnou je, aby bol akumulátor vždy dobýť natoľko, že elektromotor dokáže dopomôcť spaľovaciemu motoru, výsledkom čoho je nižšia spotreba a menšia uhlíková stopa. V opačnom prípade to má kontraproduktívny dopad. Hybridné vozidlo, vybavené spaľovacím motorom plus elektrickou jednotkou výrazne zvyšuje hmotnosť vozidla. To má za následok zvýšenie spotreby paliva, čo vedie k vypusteniu väčšieho množstva emisií do ovzdušia ako pri rovnakom modeli vybavenom len spaľovacím motorom.

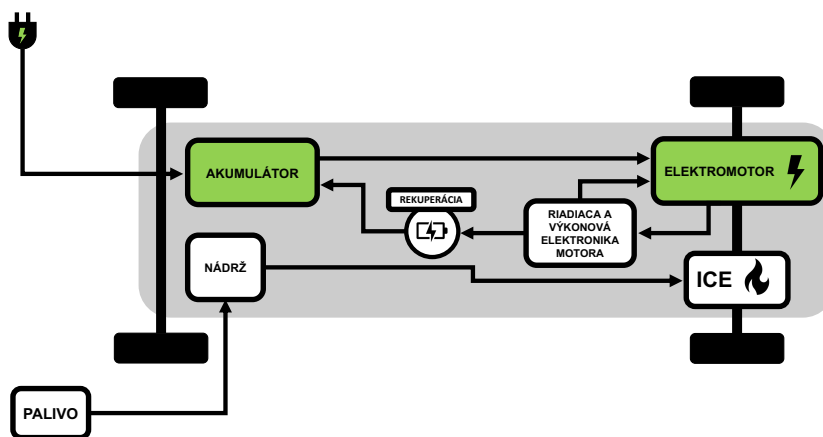
3.2 História

História hybridných automobilov sa datuje už do roku 1900, kedy ako prvý skombinoval spaľovací motor s elektromotorom Ferdinand Porsche. V tom čase len 25-ročný rodák z Vrastislavíc nad Nisou navrhol model s názvom Lohner-Porsche Mixte (v niektorých zdrojoch uvádzané aj ako Semper Vivus – navždy nažive). Vozidlo bolo vybavené dvoma elektromotormi, ktoré boli osadené priamo na nábojoch predných kolies. Namiesto akumulátora použili dva malé benzínové motory na priame napájanie generátora, ktorý následne dodával elektrinu do elektromotorov na prednej náprave. Automobil s výkonom 7,7kW dosahoval maximálnu rýchlosť 35 km/h a vážil 1700 kg.^[14] Avšak po prvej svetovej vojne obsadili trh automobily so spaľovacím motorom. Prvým novodobým priekopníkom v oblasti kombinovaného pohonu bola Toyota Prius, predstavená v roku 1997. V súčasnosti je dopyt po plug-in hybridných

vozidlách obrovský, čo dokazujú čísla predaných kusov. Svedčí o tom fakt, že v januári 2021 sa v Európe predalo okolo 95 000 hybridných automobilov.^[15]

3.3 Princíp pohonu

V súčasnosti je na trhu niekoľko typov hybridných vozidiel. Najväčšiu perspektívu do budúcnosti ponúkajú plug-in hybridné automobily (možnosť dobíjať akumulátor z bežnej zásuvky). Dojazd takýchto vozidiel a výhody boli spomenuté v kapitole 3.1. Ďalším typom je takzvaný full hybrid označovaný aj ako strong hybrid. Je to vozidlo pracujúce na rovnakom systéme ako PHEV, avšak bez možnosti dobíjania batérie z externého zdroja. Akumulátor sa dobíja len pomocou rekuperácie. Mild hybrid je označenie pre vozidlo, ktoré pre pohyb využíva vždy spaľovací motor. Elektromotor mu napomáha len pri určitých situáciách ako napríklad rozbiehanie či akcelerácia. Ďalej poznáme sériový hybrid (spaľovací motor vyrába elektrinu, ktorou sú poháňané elektromotory), paralelný hybrid, TTR paralelný hybrid (používajúci elektromotor pre pohon jednej nápravy a spaľovací motor na pohon druhej, napríklad BMW i8), či sériovo-paralelný hybrid, ktorý je technicky najpokročilejší a najkomplikovanejší.^{[16][17]}



Obr. 3.1 Všeobecná schéma pohonu PHEV.

3.4 Prehľad modelov



Obr. 3.2 Volkswagen Passat GTE.^[18]



Obr. 3.3 Mitsubishi Outlander PHEV.^[19]

Tab. 3.1 Základné informácie predstavených PHEV.

	Volkswagen Passat GTE	Mitsubishi Outlander PHEV
Výkon [kW]	160	264
Kapacita batérie [kWh]	13	13,8
Celkový dojazd [km]	1000	800
Elektrický dojazd [km]	57	35
Spotreba [kWh + l/100 km]	14,9 + 1,5	14 + 2,8
Zdvihový objem valcov [cm ³]	1395	2360
Druh paliva	benzín	benzín
Celková hmotnosť [kg]	2220	2390
Rozmery (d / š / v) [mm]	4475 / 1832 / 1442	4695 / 1800 / 1696
Cena [€] (rok 2021)	47 020	42 990

4 Vodíkové automobily

4.1 Vodíkové automobily

Vodíkové automobily (FCEV – fuel cell electric vehicle) používají jako zdroj energie potřebnej na chod vozidla vodík. Delia sa na vozidlá s priamym spaľovaním vodíka v piestovom či rotačnom spaľovacom motore alebo na vozidlá, ktoré využívajú reakciu vodíka s kyslíkom v palivovom článku na výrobu elektriny pre pohon elektromotora. Táto bakalárska práca sa zameriava práve na druhý typ – vozidlá s vodíkovým palivovým článkom.^[20] Tieto automobily sú v podstate elektromobily, ktoré si zdroj energie nesú so sebou v podobe stlačeného vodíka v nádrži.

Vodík je najrozšírenejším prvkom vo vesmíre, tvorí ho približne 75 % a je tretí najrozšírenejší prvok na Zemi. Vodík je bezfarebný, bez zápachový, netoxický, avšak vysoko horľavý a výbušný dvojatómový plyn s molekulárnym vzorcom H_2 . Vo voľnom skupenstve sa na Zemi nachádza len ojedinele – väčšinou je viazaný v zlúčeninách. Vodík je vysoko reaktívny – ľahko oxiduje s kyslíkom a v prípade dostatku oboch látok, vzniká detonačné horenie. Pre pohon vodíkových automobilov sa používa vysoko čistý vodík (s čistotou až 99,9 %), a preto je potrebné ho priemyselne vyrobiť.^[21]

4.2 História

Použitie vodíka na pohon vozidla delíme do dvoch skupín ako to bolo vysvetlené v predchádzajúcej kapitole. História vodíkových vozidiel (s priamym spaľovaním H_2 v spaľovacom motore) prekvapivo siaha ešte viac do minulosti ako história tých elektrických. Už v roku 1808, švajčiarsky inžinier Francois Isaac de Rivaz skonštruoval vôbec prvé vozidlo so spaľovacím motorom na svete, ktoré si dal aj patentovať. Celý proces obsluhy vozidla bol v porovnaní s dnešným šoférovaním veľmi zložitý. Šofér musel napríklad manuálne vpúšťať zmes vzduchu a vodíka do valca a takisto ovládať zapáľovanie.^[22]

Princíp palivového článku bol objavený v roku 1838. O prvenstvo sa delia waleský fyzik Sir William Grove a nemecký vedec Christian Friedrich Schönbein. V roku 1932 anglický inžinier Francis Thomas Bacon vyvinul palivový článok s výkonom 5kW (systém AFC – alkaline fuel cell). Princíp jeho vynálezu použila NASA v 60. rokoch 20. storočia pre kozmický výskum a programy Apollo, predovšetkým kvôli výhodnému pomeru energia/hmotnosť a takisto využitiu odpadovej vody, ktorá bola neskôr vo vodnom hospodárstve kozmickej lodi opäť použitá.^[23] V tom čase vznikla myšlienka využitiu palivových článkov v automobilovom priemysle. Ako prvá s tým prišla značka General Motors, keď predstavila model Chevrolet Electrovan s dojazdom okolo 190 km. V roku 2008 bola v troch amerických mestách spustená sieť čerpacích staníc na vodík s požičovňou vozidiel značky Honda, model FCX Clarity. V roku 2009 bola daná do prevádzky prvá čerpacia stanica na vodík na území Českej republiky, v meste Neratovice (neverejná). V tom istom roku bol vyrobený autobus značky Škoda s názvom TriHyBus (továrne označenie 24FC).^[24]

V súčasnosti ministerstvá dopravy alebo hospodárstva jednotlivých štátov financujú rozvoj svojich čerpacích staníc. Na území Slovenskej republiky by mali byť v roku 2021

vybudované prvé dve verejné čerpacie stanice na vodík. V Českej republike vzniknú tri a to v Prahe, v Litvínove a v Brne. Celosvetovo je v prevádzke približne 450 vodíkových staníc, z toho 87 sa nachádza v Nemecku.^[25]

4.3 Výroba vodíka

Existuje viacero spôsobov na výrobu vodíka, ktoré sa delia podľa zdrojovej látky. Tá sa skladá buď z fosílnych palív na báze uhlíkovodíkov alebo na báze vody. Doposiaľ najrozšírenejšia metóda (patrí jej 96 % celej produkcie) získavania vodíka je parná reformácia fosílnych palív, a to najmä zemného plynu. Avšak vznik CO₂ a nízka efektívnosť sú najväčšou nevýhodou tejto metódy. Vyrobený vodík má dokonca menej energie ako metán na začiatku procesu. Zvyšné 4% patria výrobe pomocou ostatných metód, ktorým dominuje najmä elektrolýza – oddeľovanie vodíka od vody pomocou elektrického prúdu. Pri tomto procese (opačný priebeh ako v palivovom článku) vzniká vodík s veľkým stupňom čistoty, vhodný pre využitie v palivových článkoch. V blízkej budúcnosti sa bude klásť veľký dôraz na výrobu energie potrebnej na elektrolýzu z obnoviteľných zdrojov. Tie zohrávajú veľkú úlohu pri porovnávaní energetickej náročnosti medzi rôznymi typmi automobilov.

Vodík sa dá vyrobiť aj inými metódami, avšak tie sú zatiaľ na laboratórnej úrovni. Patria k nim rôzne termochemické reakcie, ktorých výhoda je, že nepotrebujú externú elektrickú energiu, ale stačí im teplo, ktoré sa dá získať z iných procesov ako vedľajší produkt. Iné laboratórne metódy, ktoré sa skúmajú sú napríklad s využitím baktérií rodu *Clostridium* s využitím nanotechnológie či syntetickej biológie.^[26]

Podľa toho akým spôsobom a z akých zdrojov sa vodík vyrobí, sa delí na šedý, modrý a zelený:

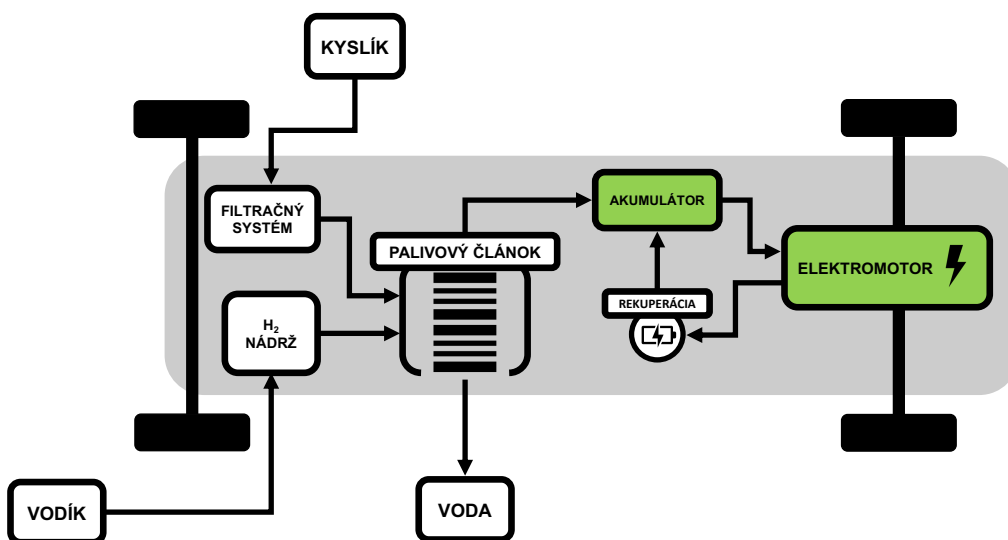
- šedý – jedná sa o vodík získaný z fosílnych palív ako medziprodukt v chemickej výrobe
- modrý – je ekologickejší ako šedý, pri jeho výrobe vznikajú takisto emisie CO₂, ktoré sa zachytávajú pomocou technológie CCS (carbon capture and storage)
- zelený – najekologickejší, pri výrobe nevznikajú žiadne emisie, je vyrábaný elektrolýzou z obnoviteľných zdrojov^[27]

4.4 Princíp pohonu

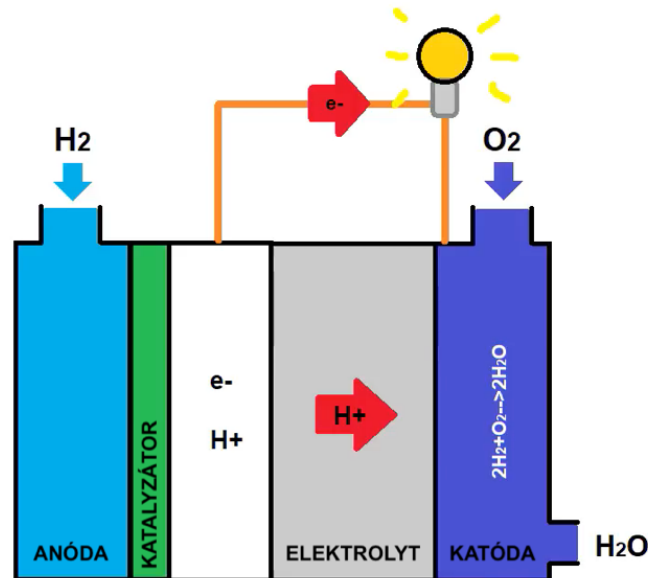
Vodíkový automobil pracujúci na princípe výroby elektriny z palivového článku je podobný tomu elektrickému s batériami. Oba sú to elektromobily vybavené elektromotormi, ktoré sú zodpovedné za chod vozidla. Na rozdiel od batérového elektromobilu, v tom vodíkovom sa nachádza palivový článok. Je to galvanický článok skladajúci sa z dvoch elektród (anódy nabíjajúcej záporne a katódy nabíjajúcej kladne), ktoré oddeľuje membrána alebo elektrolyt (obr. 4.2). Cez anódu je privádzaný vodík (palivo) z nádrže a cez katódu kyslík (okysličovadlo) z okolitého vzduchu, ktorý je nasávaný a dôkladne filtrovaný od nečistôt cez prednú masku vozidla. Katalyzátor, nachádzajúci sa na anóde nám zabezpečí rozdelenie molekúl vodíka na protóny a elektróny. Pozitívne častice vodíka môžu prechádzať skrz membránu, tie negatívne naopak nie.

Elektróny sú nútené použiť na pohyb ku katóde obvod, pričom je produkovaná elektrina a teplo. Po chemickej reakcii medzi elektródami vzniká ako odpadový materiál voda. Tieto procesy v palivových článkoch pracujú s určitou zotrvačnosťou, a tak sa vo vozidle nachádza akumulátor (spravidla nie väčší ako 2 kWh), ktorý slúži ako stabilizačný prvok. Systém nemusí nútiť články k prudkým zmenám napätia na výstupe, namiesto toho reguluje napätie na akumulátore, ktorý prudké zmeny znáša bez problémov. Elektrina z akumulátora je dodávaná do elektromotora, ktorý ju premení na mechanickú prácu kolies.

Elektródy palivového článku sú katalyticky a reaktívne stabilné. Palivové články sú spoľahlivé a dokážu pracovať nepretržite, pokiaľ je zaručený prívod paliva a okysličovadla ku elektródam. Ich výhodou je takisto konštrukcia, ktorá neobsahuje žiadne pohyblivé časti, a preto je chod veľmi tichý. Naopak nevýhodou je teplo, vznikajúce pri prevádzke, ktoré ak by nebolo dostatočne odvádzané, mohlo by palivové články poškodiť. Na druhej strane sa toto teplo môže v zimnom období čiastočne využiť na vykurovanie kabíny, čím sa zvyšuje celková efektívnosť automobilu. Nevýhodou je aj vysoká cena katalyzátora, ktorý je vyrobený z platiny.^[20]



Obr. 4.1 Všeobecná schéma pohonu FCEV s palivovým článkom.



Obr. 4.2 Schéma palivového článku na vodík.^[28]

4.5 Prehľad modelov

V čase písania bakalárskej práce sú počty predaných FCEV relatívne nízke, v porovnaní napríklad s BEV a PHEV. V roku 2019 sa v Európe predalo 535 kusov vozidiel poháňaných vodíkom. Naproti predaju batériových EV a hybridov v roku 2020 presiahli 2,2 milióna predaných kusov.^[10] Od toho sa odvíja aj ponuka na trhu, ktorú zatiaľ tvorí iba 5 sériovo vyrábaných modelov. Veľkými priekopníkmi v tomto segmente sú automobilové spoločnosti Toyota a Hyundai. Prvá spomínaná prišla v roku 2015 s modelom s názvom Mirai (doslovný preklad z japončiny znamená budúcnosť), v roku 2020 predstavila druhú generáciu tohto vozidla. Spoločnosť Hyundai vyrobila svoje prvé vodíkom poháňané vozidlo už v roku 2001 (model Santa Fe FCEV), v roku 2018 predstavila model Nexo.



Obr. 4.3 Toyota Mirai II. generácie.^[29]



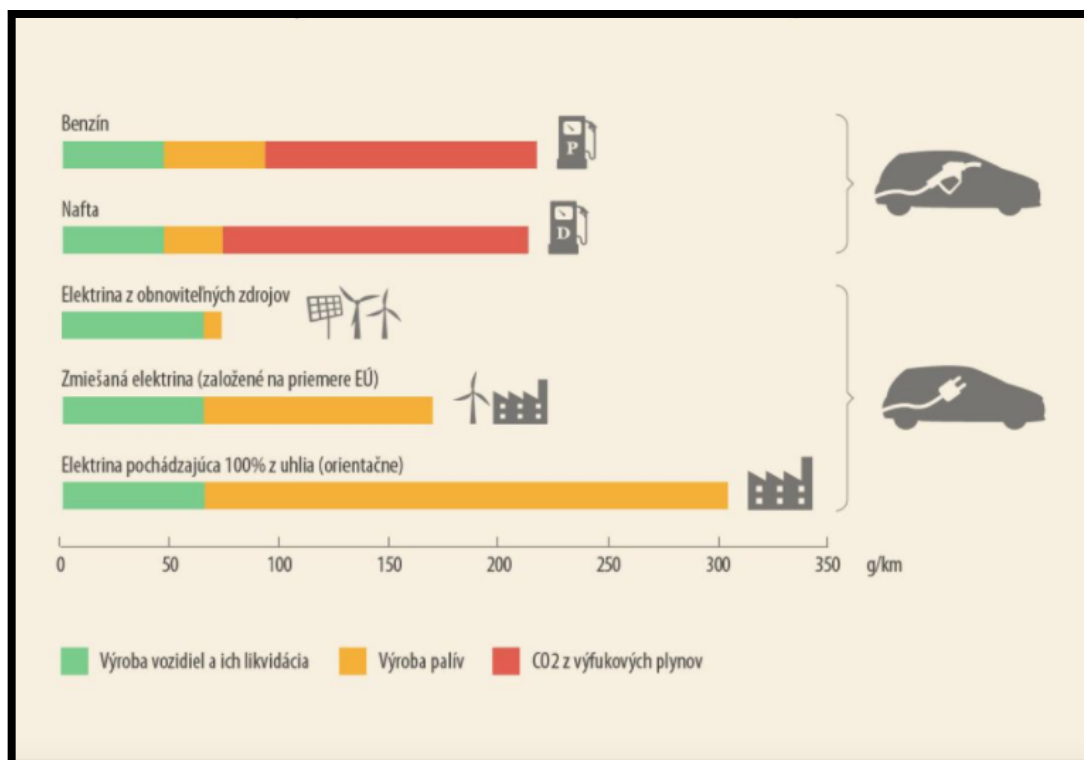
Obr. 4.4 Hyundai Nexo.^[30]

Tab. 4.1 Základné informácie predstavených FCEV.

	Toyota Mirai	Hyundai Nexo
Výkon [kW]	134	120
Kapacita zásobníku paliva [kg]	5,6	6,3
Dojazd [km]	650	756
Spotreba [kg/100 km]	0,76	0,84
Celková hmotnosť [kg]	2415	1889
Rozmery (d / š / v) [mm]	4975 / 1885 / 1470	4670 / 1805 / 1545
Cena [€] (rok 2021)	62 990	69 000

5 Energetická a emisná náročnosť pohonov

Snahy o zníženie produkcie CO₂ v doprave sa rozdeľujú na dve cesty. Jednou z nich je zvýšenie efektivity spaľovacích motorov, tou druhou je prechod na alternatívne palivá a pohony. Efektivita jednotlivých pohonov vo veľkej miere závisí na spôsobe výroby a distribúcii jednotlivého nosiča energie (či už je to priamo elektrina alebo vodík). Hlavnou myšlienkou alternatívnych pohonov je výroba vozidiel, ktoré budú za sebou zanechávať čo najmenšiu uhlíkovú stopu. Elektromobily (BEV, FCEV) pri jazde neprodukujú priame emisie, avšak množstvo skleníkových plynov, vypustených počas výroby a likvidácie týchto vozidiel, je častokrát vyššie ako pri konvenčných motorových vozidlách.^{[32][33]}



Obr. 5.1 Emisie z dopravy v EÚ – upravené.^[33]

Spôsob výroby elektriny a vodíka má zásadný vplyv na nepriame emisie elektromobilov. V nasledujúcich kapitolách sa zameriam na energetický mix krajín, ktorý sa medzi sebou výrazne líši. Porovnávať vodíkové elektromobily s tými batériovými a plug-in hybridmi má význam v krajinách kde je vybudovaná aspoň základná sieť vodíkových čerpacích staníc. Túto podmienku spĺňajú nasledujúce krajiny: Nemecko, Kalifornia, Japonsko, Južná Kórea a Čína.

5.1 Energetický mix krajín

Energetický mix je zastúpenie jednotlivých zdrojov na výrobe elektriny.

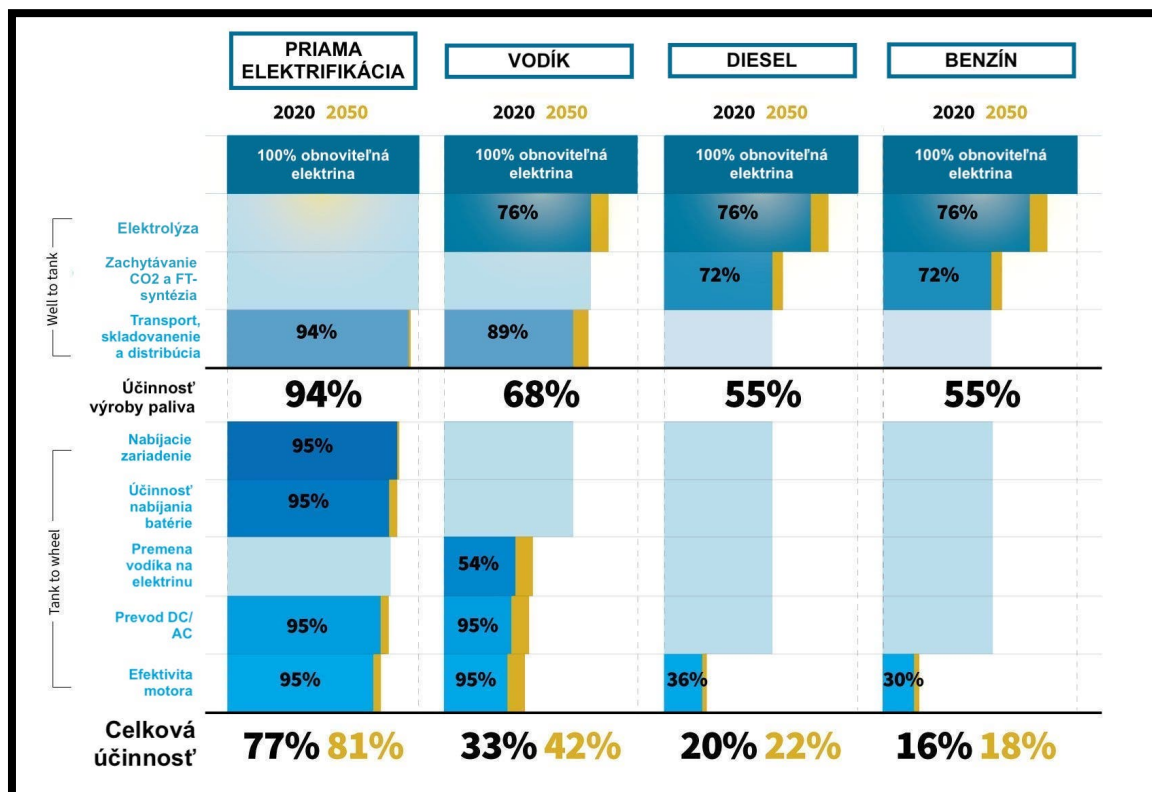
Tab. 5.1 Energetický mix – podiel jednotlivých zdrojov na výrobe elektriny [%].^{[34][35]}

zdroj energie	krajina				
	Nemecko	Kalifornia	Japonsko	Južná Kórea	Čína
uhlie	23,66	2,96	30,94	41,47	63,48
ropa	3,97	0,16	5,17	1,19	0,95
zemný plyn	16,15	34,23	33,88	25,76	3,2
fosílna palivá spolu	43,78	37,35	69,99	68,42	67,63
jadrové palivo	11,33	8,98	7,13	25,56	4,7
vietor	23,71	10,17	0,83	0,49	5,47
voda	3,3	16,65	7,32	0,54	17,34
slnečné žiarenie	8,99	12,28	7,52	2,21	3,02
OZE spolu	36	39,1	15,67	3,24	25,83
ostatné	8,89	14,57	7,21	2,78	1,84
celkom	100	100	100	100	100

Najekologickejším spôsobom výroby elektriny je z obnoviteľných zdrojov (OZE). Z tabuľky je zrejmé, že „najzelenšou“ krajinou je Kalifornia, kde podiel vyrobenej elektriny z uhlia je len 2,96 % a súčet OZE sa rovná 39,1 %, čomu prispieva geologická poloha štátu.

5.2 Energetické straty pohonov

Výraz well-to-wheel (doslovný preklad z angličtiny „zo zdroja na koleso“) je cyklus paliva, ktoré je vyrobené s určitou efektívnosťou. Následne musí byť uskladnené a premiestnené na konkrétne miesto. Palivo alebo nosič energie vo vozidle prechádza rôznymi technickými časťami až k motoru, ktorý túto energiu paliva/nosiča premení na mechanickú prácu. Všetky spomenuté segmenty znižujú celkovú účinnosť prvej energie. Niektoré sú efektívnejšie (distribúcia a účinnosť častí elektrického pohonu), iné naopak menej (efektívnosť spaľovacích motorov). Tejto analýze bol zameraný výskum, ktorý spravila Európska federácia pre dopravu a životné prostredie a ktorého výsledkom je obr. 5.2. Číslo zlatej farby v obrázku predstavujú predpokladanú účinnosť v roku 2050.



Obr. 5.2 Efektívnosť jednotlivých pohonov – upravené.^[36]

5.3 Ekonomická náročnosť pohonov pre konečného zákazníka

Nasledujúca tabuľka ukazuje cenu paliva potrebného na prejsenie vzdialenosti 100 kilometrov. Cena za elektrinu bola stanovená pre odberné miesto s ročnou spotrebou elektriny prevyšujúcou 1361 kWh. Spotreba plug-in hybridu VW Passat GTE bola vypočítaná ako priemerná spotreba po prejsení 60 kilometrovej testovacej dráhy.

Tab. 5.2 Cena za 100 km [€].^{[37][38][39]}

	Tesla Model 3	VW Passat GTE	Toyota Mirai
Spotreba/100 km	16 kWh	14,9 kWh + 1,5 l	0,76 kg
Cena za: 1 kWh elektriny	0,1354	0,1354	
1 liter benzínu		1,334	
1 kg vodíku			9,5
Cena v €/100 km	2,17	4,02	7,22

Do tabuľky boli zahrnuté vybrané modely automobilov z triedy sedan. Ceny sa môžu meniť v závislosti od miesta prevádzky vozidla (pre všetky modely) a spôsobu dobíjania (v prípade elektromobilov a plug-in hybridov).

5.4 Efektivita výroby vodíka

Ako bolo uvedené v kapitole 4.3, najrozšírenejšou a ekonomicky najdostupnejšou metódou výroby vodíka je parná reformácia fosílnych palív. Naopak z pohľadu ekológie a čistoty vyrobeného vodíka potrebného pre palivové články je najvhodnejšou metódou elektrolýza. V nasledujúcich kapitolách je opísaná efektivita spomenutých metód.

5.4.1 Účinnosť parnej reformácie

Účinnosť parnej reformácie zemného plynu (SMR – steam methane reforming) je okolo 76 %. Táto metóda využíva katalyzátor, najčastejšie nikel, na uľahčenie termochemickej reakcie zemného plynu a vody pri teplotách 850 °C a tlaku 2,5 MPa. Metán nachádzajúci sa v zemnom plyne reaguje s parou za vzniku syntézneho plynu pozostávajúceho z vodíka a oxidu uhoľnatého.^[40]

5.4.2 Účinnosť elektrolýzy

Elektrolýza vody je proces štiepenia vody (H₂O) na atómy vodíka (H₂) a kyslíka (O₂). V základnej podobe sú všetky elektrolýzery zložené z anódy, katódy a vodivého média (elektrolytu). Elektrický prúd generuje tok iónov s kladným nábojom (vodík) na katódu (záporná elektróda), kde získavajú elektróny a sú redukované. Naopak, negatívne nabité ióny sa pohybujú smerom k anóde (kladná elektróda), ktorá stráca elektróny a oxiduje. Pri tomto procese sa voda rozpadá a vytvára vodík (katóda) a kyslík (anóda). Komerčné elektrolýzery majú účinnosť výroby vodíka 68 – 80 %, čo závisí od napätia článku (obvykle 1,9 – 2,2 V), teploty (70 – 90 °C), prúdenia elektrolytu a prevádzkového tlaku. Efektivita 80 % je však dosiahnuteľná s použitím drahých materiálov ako nikel či platina, obvyklá účinnosť elektrolýzy je tak 75 %. Na obr. 5.3 je možné vidieť praktické využitie výroby vodíka z obnoviteľných zdrojov energie, konkrétne z fotovoltickej elektrárne. Ako bolo spomenuté, kľúčovou výhodou elektrolýzy oproti fosílnym palivám je vysoká čistota vyrobeného vodíka (viac ako 99,99 %), ktorý je vhodný na napájanie palivových článkov bez ďalšieho čistenia.^[40]

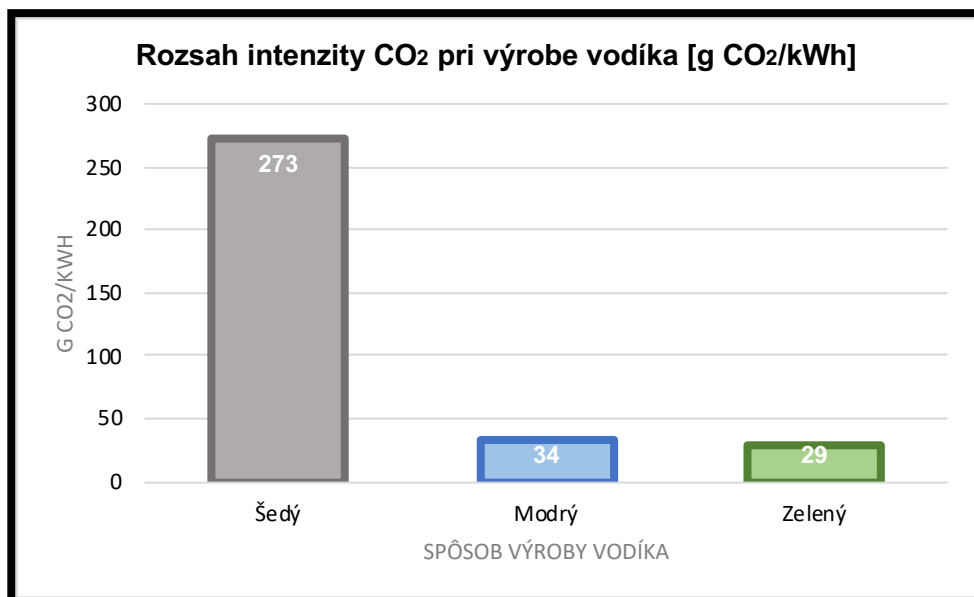
Efektivita výroby vodíka je vo veľkej miere ovplyvnená jej spôsobom výroby – lokálna výroba vodíka, napr. priamo na čerpacej stanici pomocou fotovoltických panelov a elektrolýzera nedosahuje efektivitu masovej výroby, avšak je k nej potrebné prirátat energiu potrebnú na prepravu.



Obr. 5.3 Elektrolýzér s příkonem 7 kW, pripojený na fotovoltaickú elektrárň – príklad lokálnej výroby vodíka pomocou OZE (pilotný projekt výroby zeleného vodíka, firma ÚJV Řež, Česká republika).^[41]

5.4.3 Množstvo vyprodukovaného CO₂ pri výrobe vodíka

Ako bolo spomenuté v kapitole 4.3, vodík sa podľa výroby delí do troch skupín (šedý, modrý a zelený). Každá z týchto metód vyprodukuje určité množstvo skleníkových plynov počas výroby. Odhad množstva vyprodukovaného CO₂ v gramoch na kilowatt hodinu je možné vidieť na obr. 5.4. Je zrejmé, že najvyšší podiel CO₂ produkuje výroba šedého vodíka z fosílnych palív, a to najmä zemného plynu. Naopak najekologickejšim je zelený vodík, pri ktorého výrobe je vyprodukovaných od 0 do 29 g CO₂/kWh.



Obr. 5.4 Odhadované množstvo CO₂ pri výrobe vodíka.^{[42][43][44]}

Odhadované náklady na výrobu šedého vodíka v Európe sú podľa Európskej komisie okolo 1,5 €/kg v závislosti ceny zemného plynu, 2€/kg v prípade výroby modrého vodíka a 3,5 – 6 €/kg pri výrobe zeleného vodíka.^[45]

5.5 Energetická náročnosť a emisie pri výrobe elektriny a vodíka

V nasledujúcej tabuľke je uvedená stredná náročnosť výroby elektriny, energetická náročnosť a množstvo vyprodukovaných CO₂ pri výrobe elektriny a vodíka. Stredná účinnosť pre elektrárne na fosilne palivá bola vypočítaná pomocou BTU jednotiek (British thermal unit). Napríklad priemerná miera tepla jadrovej elektrárne je približne 10 000 BTU/kWh. Avšak na výrobu jednej kWh je potrebné len 3412 BTU. Rozdiel medzi 10 000 a 3412 sú straty, ktoré vzniknú pri výrobe (chladenie, atď).

Naznačenie výpočtu pre prvý riadok tabuľky:

$$\eta_u = \frac{3412}{10551} = 0,323 = 32,3 \text{ [%]}$$

$$en_u = \frac{1}{n_u} = \frac{1}{0,323} = 3,09 \text{ [kWh]}$$

Tab. 5.3 Elektrina - stredná účinnosť, energetická náročnosť a priemerné emisie.^{[46][47]}

zdroj energie		stredná účinnosť [%]	energetická náročnosť na výrobu 1kWh [kWh]	priemerné emisie [g CO ₂ /kWh]
fosilne palivá	uhlie	32,3	3,09	971
	ropa	30,6	3,26	733
	zemný plyn	44,1	2,27	499
	priemer	35,7	2,87	734,33
jadro	jadrové palivo	32,7	1,10	29
OZE	vietor	94,4	0,06	26
	voda	99,3	0,01	26
	slnečné žiarenie	85,7	0,14	85
	priemer	93,1	0,07	45,67

Poznámka č. 1 – pri výrobe elektriny z OZE je účinnosť vzhľadom k spotrebovanej primárnej energii 100 %, do výpočtov sa však započítavajú aj náklady na výstavbu elektrárne

Poznámka č. 2 – koncepcia uránu ako paliva je z energetickej náročnosti problematická, na rozdiel od iných zdrojov sa dá využiť len v jadrovej elektrárni

Poznámka č. 3 – účinnosť a energetická náročnosť u jadrového, veterného, vodného a solárneho typu elektrárne bola vypočítaná podľa EROEI

Poznámka č. 4 – priemerné emisie vyprodukované počas výroby elektriny boli prevzaté zo zdroja č. 47

Tab. 5.4 Vodík - energetická náročnosť na výrobu, kompresiu, skladovanie a priemerné emisie.^{[42][43][44]}

spôsob výroby vodíka	energetická náročnosť na výrobu, kompresiu a skladovanie 1 kg vodíka [kWh/kg]	priemerné emisie [g CO ₂ /kg]	priemerné emisie [g CO ₂ /kWh]
šedý	47,8	9000	273
modrý	54,4	1120	34
zelený	59,4	950	29

Poznámka č. 1 – vo výpočtoch je počítané s energetickou náročnosťou 4,4 kWh/kg vodíka pre potreby kompresie a skladovania (miestna výroba vodíka), táto hodnota bola pripočítaná k energetickej náročnosti pre výrobu vodíka

Pri výpočtoch pre vodík sa postupovalo nasledovne: 1 kilogram vodíka obsahuje energiu rovnajúcu sa 33kWh.^[48] Energetická náročnosť na výrobu jednej kilowatt hodiny je obsiahnutá v $\frac{1}{33}$ kilogramu vodíka. Účinnosť parnej reformácie metánu je 76 %. Na výrobu jedného kilogramu vodíka je potrebných 43,4 kWh energie. Z toho vyplýva, že na výrobu 1 kWh je potrebných 1,315 kWh energie (v prípade výroby šedého vodíka). V prípade modrého vodíka bolo počítané, že efektívnosť výroby poklesne o 10 % (stredná hodnota, podľa zdroja 5 - 14 %) voči výrobe šedého vodíka.^[49] Je to z toho dôvodu, že metóda na zachytávanie CO₂, tzv. CCS, vyžaduje dodatočné energetické vstupy ako napr. čistenie, stláčanie, alebo transport vyrobeného vodíka. V prípade výroby zeleného vodíka bolo počítané s tým, že na 1 kilogram vodíka je potrebných 55 kWh energie.^[50]

5.6 Celková emisná náročnosť

Nasledujúca tabuľka preukazuje emisnú náročnosť pohonov v jednotlivých krajinách – koľko gramov CO₂ je vyprodukovaných pri prejdenej vzdialenosti 100 kilometrov. Vo výpočtoch pre batériové elektromobily sa vychádzalo z percentuálneho podielu energetického mixu krajín z tab. 5.1 kombináciou s priemerne vyprodukovanými emisiami na 1 kWh vyrobenej elektriny z tab. 5.3. Pre plug-in hybridné vozidlá sa vo výpočtoch postupovalo rovnako, avšak k výsledku bolo pripočítané množstvo vyprodukovaných CO₂ plynov pri pohone vozidla spaľovacím motorom v dobe, keď je akumulátor už vybitý.

Pri výpočtoch s vodíkom sa postupovalo inak. Nakoľko v čase písania bakalárskej práce, prevažnú časť výroby vodíka predstavuje spôsob parnej reformácie zemného plynu bez zachytávania CO₂ emisií, čiže výroba šedého vodíka. Vo výpočtoch bolo tejto metóde pridelených 96 % výroby. Výrobe modrého vodíka z fosílnych palív so systémom zachytávania CO₂ emisií a výrobe zeleného vodíka, bolo pridelených zhodne po 2 %. Nakoľko nie je dostupná žiadna štatistika podielu výroby vodíka vo vybraných štátoch, výsledky sa zjednotili.

Tab. 5.5 Emisná náročnosť jednotlivých vozidiel [g CO₂/100km] – rok 2021.

rok 2021		BEV		PHEV		FCEV	
		Tesla Model 3	Škoda Enyaq	VW Passat GTE	Mitsubishi Outlander	Toyota Mirai	Hyundai Nexo
Emisná náročnosť modelov	Nemecko	6 273	7 214	9 642	10 912	6598	7292
	Kalifornia	4 441	5 107	7 936	9 069		
	Japonsko	8 737	10 048	11 937	13 392		
	Južná Kórea	8 965	10 310	12 149	13 621		
	Čína	10 502	12 077	13 580	15 167		

Všeobecný vzorec výpočtu pre BEV:

$$Em_n = \left[P_u \cdot em_u + P_r \cdot em_r + P_{zp} \cdot em_{zp} + P_j \cdot em_j + P_{ve} \cdot em_{ve} + P_{vo} \cdot em_{vo} + P_s \cdot em_s + \frac{P_o}{2} \cdot \left(\frac{em_u + em_r + em_{zp}}{3} + \frac{em_{ve} + em_{vo} + em_s}{3} \right) \right] \cdot el_{sp} \text{ [g CO}_2\text{/100km]}$$

Všeobecný vzorec výpočtu pre PHEV:

$$Em_n = \left[P_u \cdot em_u + P_r \cdot em_r + P_{zp} \cdot em_{zp} + P_j \cdot em_j + P_{ve} \cdot em_{ve} + P_{vo} \cdot em_{vo} + P_s \cdot em_s + \frac{P_o}{2} \cdot \left(\frac{em_u + em_r + em_{zp}}{3} + \frac{em_{ve} + em_{vo} + em_s}{3} \right) \right] \cdot el_{sp} + em_{ice} \text{ [g CO}_2\text{/100km]}$$

Všeobecný vzorec výpočtu pre FCEV:

$$Em_n = (P_{šv} \cdot em_{šv} + P_{mv} \cdot em_{mv} + P_{zv} \cdot em_{zv}) \cdot v_{sp} \text{ [g CO}_2\text{/100km]}$$

- kde P..... je podiel daného zdroja na výrobe elektriny (hodnota z tab. 5.1 podelená 100), alebo podiel výroby vodíka
 em.....emisie CO₂ daného zdroja pri výrobe 1 kWh (hodnota z tab. 5.3, 5.4)
 el_{sp}..... spotreba elektrickej energie na 100 kilometrov (tab. 2.1)
 em_{ice}...emisie vyprodukované spaľovacím motorom počas jazdy na 100 km
 v_{sp}..... spotreba vodíka na 100 kilometrov (4.1)
 u, r, zp, j, ve, vo, s, o..... indexy označujúce spôsob výroby elektriny v poradí: uhlie, ropa, zemný plyn, jadrové, veterné, vodné, solárne, ostatné
 šv, mv, zv..... indexy označujúce spôsob výroby vodíka v poradí: šedý vodík, modrý vodík, zelený vodík

Konkrétny výpočet pre Nemecko a elektromobil Tesla Model 3:

$$Em_n = \left[0,2366 \cdot 971 + 0,0397 \cdot 733 + 0,1615 \cdot 499 + 0,1133 \cdot 29 + 0,2371 \cdot 26 + 0,0330 \cdot 26 + 0,0899 \cdot 85 + \frac{0,0889}{2} \cdot \left(\frac{971 + 733 + 499}{3} + \frac{26 + 26 + 85}{3} \right) \right] \cdot 16 = 6\,273 \text{ g CO}_2\text{/100km}$$

Tabuľka 5.5 predstavuje emisnú náročnosť vozidiel v roku 2021. Avšak pri podpise Parížskej dohody sa Európska únia (a ďalších 194 signatárov) dohodla na dosiahnutí uhlíkovej neutrality do roku 2050. Znamená to, že svet dosiahne rovnováhu medzi produkovanými emisiami uhlíka a ich pohlcovaním. Medzi prirodzené pohlcovače CO₂ patria napríklad lesy, pôda alebo oceány. Podľa odhadov pohlčia 9,5 až 11 Gt CO₂ ročne. Avšak za rok 2019 bolo podľa Medzinárodnej agentúry pre energetiku vyprodukovaných približne 33,4 Gt CO₂, za rok 2020 (poznačený svetovou pandémiou Covid-19) 31,5 Gt CO₂.^{[51][52]}

V nasledujúcej tabuľke je predstavený odhadovaný energetický mix výroby elektriny z jednotlivých zdrojov v roku 2050. Každá z krajín berie do úvahy viacero možností. Od tých pesimistických, kedy množstvo skleníkových plynov porastie z dôvodu nízkeho podielu výroby elektriny z OZE až po tie vizionárske, kedy podiel dostupnej elektriny z obnoviteľných zdrojov dosiahne 100 %.

Tab. 5.6 Odhadovaný energetický mix v roku 2050 – podiel jednotlivých zdrojov na výrobe elektriny [%].^{[53][54][55][56][57]}

zdroj	krajina				
	Nemecko	Kalifornia	Japonsko	Južná Kórea	Čína
fosílné palivá	20	7	45	49	30
jadrové palivo	0	3	0	6	14
OZE	80	90	55	45	56
	100	100	100	100	100

Tab. 5.7 Odhadovaná emisná náročnosť jednotlivých vozidiel [g CO₂/100km] – rok 2050.^[58]

rok 2050		BEV		PHEV		FCEV	
		Tesla Model 3	Škoda Enyaq	VW Passat GTE	Mitsubishi Outlander	Toyota Mirai	Hyundai Nexa
Emisná náročnosť modelov	Nemecko	2 934	3 375	6 533	7 553	1086	1200
	Kalifornia	1 494	1 718	5 191	6 103		
	Japonsko	5 689	6 542	9 098	10 325		
	Južná Kórea	6 114	7 031	9 493	10 752		
	Čína	3 999	4 599	7 524	8 624		

Poznámka č. 1 – do výpočtov nebol zahrnutý predpoklad vývoja technológií do roku 2050

Poznámka č. 2 – vo výpočtoch bolo počítané s priemernými emisiami z tab. 5.3

Poznámka č. 3 – percentuálny podiel výroby šedého, modrého a zeleného vodíka bol prevzatý zo zdroja č. 58 (percentuálny podiel, s ktorým bolo počítané - šedý 5 %, modrý 45 %, zelený 50 %)

5.7 Celková energetická náročnosť

Nasledujúca tabuľka predstavuje množstvo energie, ktoré je nutné vynaložiť na prejsenie 100 kilometrov v jednotlivých modeloch vozidiel. Jedná sa o energiu, ktorá je využitá priamo v spaľovacom motore, tepelnej elektrárni pri výrobe elektriny alebo je získaná z obnoviteľných zdrojov. Vo výpočtoch sú zahrnuté údaje z tab. 5.1 (energetický mix krajín), z tab. 5.3 (energetická náročnosť na výrobu 1 kWh elektriny), ako aj údaje z tab. 5.4 (energetická náročnosť na výrobu, kompresiu a skladovanie vodíka). Výsledok pre jednotlivé modely bol potom vynásobený ich priemernou spotrebou na 100 kilometrov.

Tab. 5.8 Energetická náročnosť jednotlivých vozidiel – potrebné množstvo vyrobenej energie v kWh na prejsenie vzdialenosti 100 km [kWh/100km] – rok 2021.^[59]

rok 2021		BEV		PHEV		FCEV	
		Tesla Model 3	Škoda Enyaq	VW Passat GTE	Mitsubishi Outlander	Toyota Mirai	Hyundai Nexa
spotreba na 100km		16 kWh	18,4 kWh	14,9 kWh + 1,5 l	14 kWh + 2,8 l	0,76 kg	0,84 kg
Energetická náročnosť modelov	Nemecko	27,4	31,5	38,5	48,2	36,6	40,5
	Kalifornia	21,8	25,1	33,3	43,3		
	Japonsko	34,1	39,2	44,7	54,1		
	Južná Kórea	35,0	40,8	46,1	55,3		
	Čína	38,0	43,7	48,4	57,5		

Poznámka č. 1 – pri výpočtoch pre BEV a PHEV bolo počítané s hodnotou 1 pre energetickú účinnosť z OZE

Poznámka č. 2 – pri výpočtoch pre PHEV bolo počítané s energetickou náročnosťou benzínu 8,67 kWh/liter

Poznámka č. 3 – pri výpočtoch pre FCEV bol percentuálny podiel výroby vodíka rozdelený nasledovne: šedý 96%, modrý 2 %, zelený 2 %

Všeobecný vzorec výpočtu pre BEV:

$$En_n = (P_u \cdot en_u + P_r \cdot en_r + P_{zp} \cdot en_{zp} + P_j \cdot en_j + P_{ve} + P_{vo} + P_s) \cdot el_{sp} \text{ [kWh/100km]}$$

Všeobecný vzorec výpočtu pre PHEV:

$$En_n = (P_u \cdot en_u + P_r \cdot en_r + P_{zp} \cdot en_{zp} + P_j \cdot en_j + P_{ve} + P_{vo} + P_s) \cdot el_{sp} + ice_{sp} \cdot en_b \text{ [kWh/100km]}$$

Všeobecný vzorec výpočtu pre FCEV:

$$En_n = (P_{šv} \cdot en_{šv} + P_{mv} \cdot en_{mv} + P_{zv} \cdot en_{zv}) \cdot v_{sp} \text{ [g CO}_2\text{/100km]}$$

- kde P..... je podiel daného zdroja na výrobe elektriny (hodnota z tab. 5.1 podelená 100), alebo podiel výroby vodíka
 en.....energetická náročnosť daného zdroja na výrobu 1 kWh (tab. 5.3)
 el_{sp}..... spotreba elektrickej energie na 100 kilometrov (tab. 2.1)
 ice_{sp}.....spotreba benzínu na 100 kilometrov (tab. 3.1)
 en_b..... energetická náročnosť benzínu v kWh na liter
 v_{sp}..... spotreba vodíka na 100 kilometrov (4.1)
 u, r, zp, j, ve, vo, s.....indexy označujúce spôsob výroby elektriny v poradí:
 uhlie, ropa, zemný plyn, jadrové, veterné, vodné, solárne
 šv, mv, zv..... indexy označujúce spôsob výroby vodíka v poradí:
 šedý vodík, modrý vodík, zelený vodík

Konkrétny výpočet pre Nemecko a elektromobil Tesla Model 3:

$$En_n = (0,2366 \cdot 3,09 + 0,0397 \cdot 3,26 + 0,1615 \cdot 2,27 + 0,1133 \cdot 1,10 + 0,2371 + 0,0330 + 0,0899) \cdot 16 = 27,4 \text{ kWh}$$

V nasledujúcej tabuľke sú výsledky výpočtov vychádzajúcich z odhadovaného energetického mixu z tab. 5.6, z energetickej náročnosti z tab. 5.3, odhadovaného podielu výroby vodíka a z jeho energetickej náročnosti.

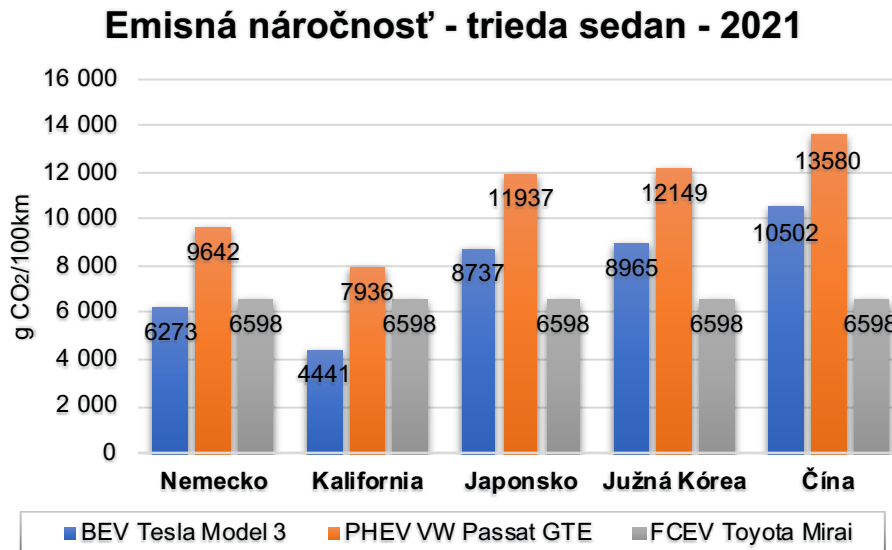
Tab. 5.9 Odhadovaná energetická náročnosť jednotlivých vozidiel [kWh/100km] – rok 2050.

rok 2050		BEV		PHEV		FCEV	
		Tesla Model 3	Škoda Enyaq	VW Passat GTE	Mitsubishi Outlander	Toyota Mirai	Hyundai Nexo
spotreba na 100km		16 kWh	18,4 kWh	14,9 kWh + 1,5 l	14 kWh + 2,8 l	0,76 kg	0,84 kg
Energetická náročnosť modelov	Nemecko	22,0	25,3	33,5	43,5	43,0	47,5
	Kalifornia	18,1	20,9	29,9	40,2		
	Japonsko	29,5	33,9	40,5	50,1		
	Južná Kórea	30,8	35,4	41,7	51,2		
	Čína	25,2	29,0	36,5	46,3		

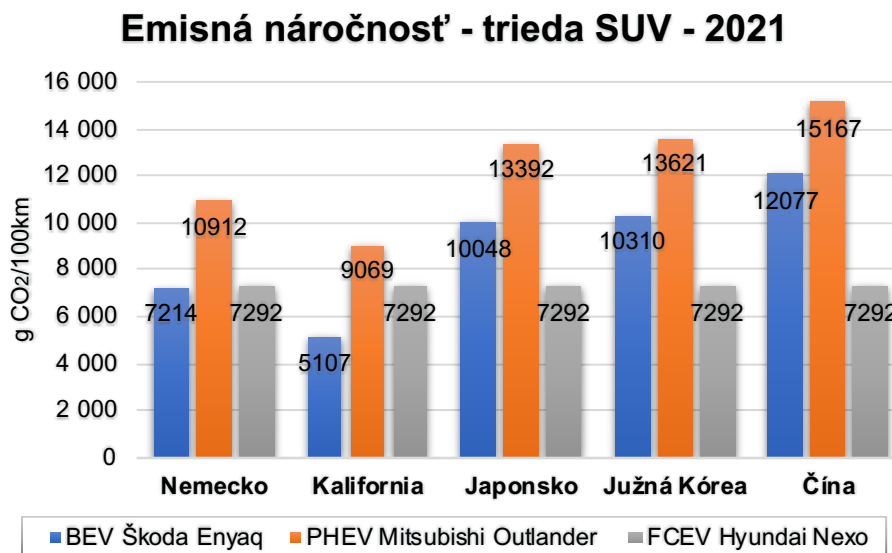
Poznámka č. 1 – percentuálny podiel výroby šedého, modrého a zeleného vodíka bol prevzatý zo zdroja č. 58 (percentuálny podiel, s ktorým bolo počítané - šedý 5 %, modrý 45 %, zelený 50 %)
 Poznámka č. 2 – do výpočtov nebol zahrnutý predpoklad vývoja technológií do roku 2050

6 Grafické znázornenie a porovnanie výsledkov

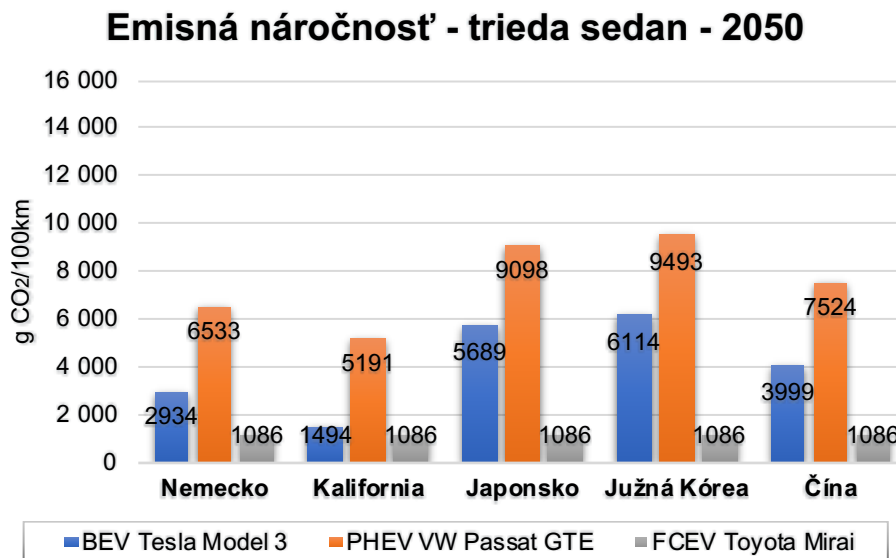
6.1 Porovnanie z pohľadu emisnej náročnosti



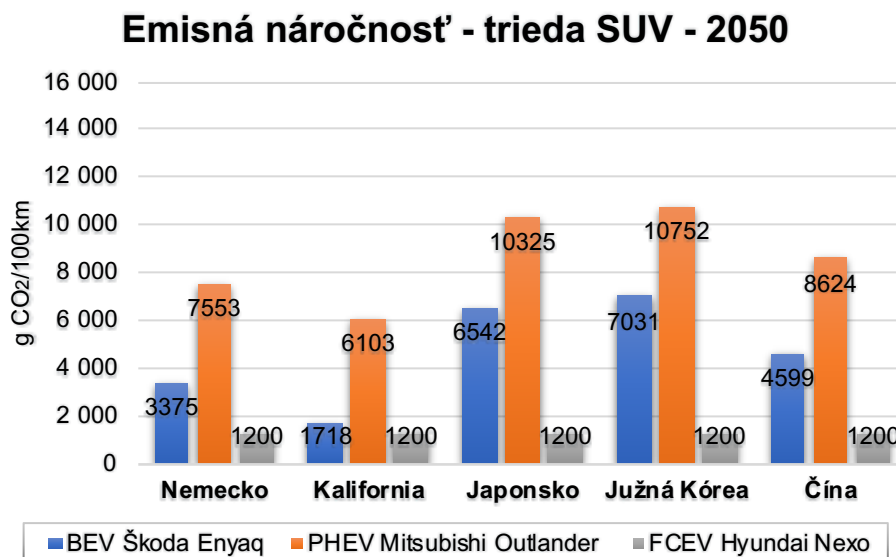
Obr. 6.1 Celková emisná náročnosť modelov v triede sedan, rok 2021.



Obr. 6.2 Celková emisná náročnosť modelov v triede SUV, rok 2021.



Obr. 6.3 Predpokladaná emisná náročnosť modelov v triede sedan, rok 2050.



Obr. 6.4 Predpokladaná emisná náročnosť modelov v triede SUV, rok 2050.

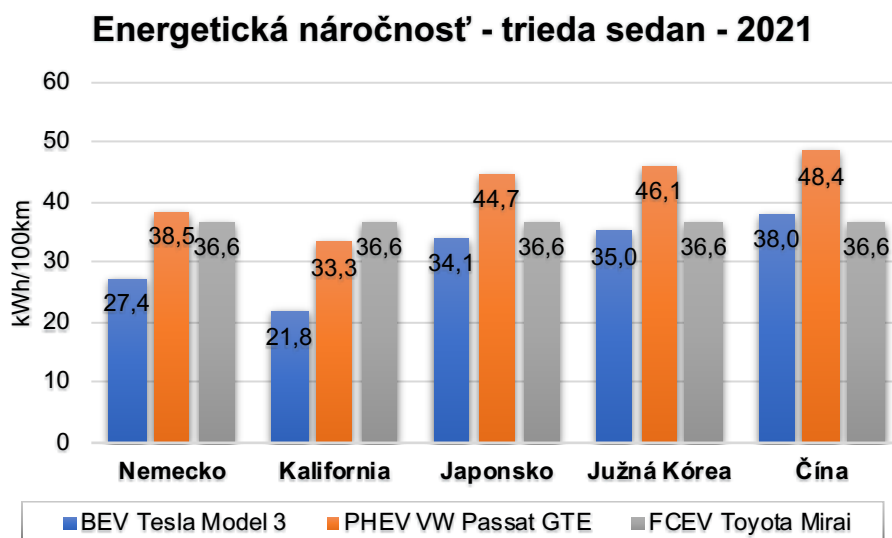
6.1.1 Diskusia výsledkov emisnej náročnosti

Z grafov je zjavné, že v súčasnosti je z pohľadu emisnej náročnosti najekologickejšia prevádzka batériového elektromobilu v krajine s vysokým podielom výroby elektriny z obnoviteľných zdrojov ako je napríklad Kalifornia. Dôkazom toho je obr. 6.1, ktorý poukazuje, že emisná náročnosť prevádzky elektromobilu Tesla Model 3 v tejto oblasti je takmer dva a pol krát nižšia ako prevádzka toho istého modelu v Číne. Presne 136% nárast emisií je možné pripísať vysokému podielu výroby elektriny z uhlia v Číne. Zaujímavý je aj výsledok pri súčasnom energetickom mixe Nemecka. Prevádzka BEV a FCEV je v tomto prípade takmer identická, je ale nutné poznamenať, že infraštruktúra pre vodíkový pohon je aj v tejto krajine veľmi obmedzená. V prípade, že sa energetický mix krajiny podobá Japonsku, Južnej Kórei alebo Číne, t. j. množstvo

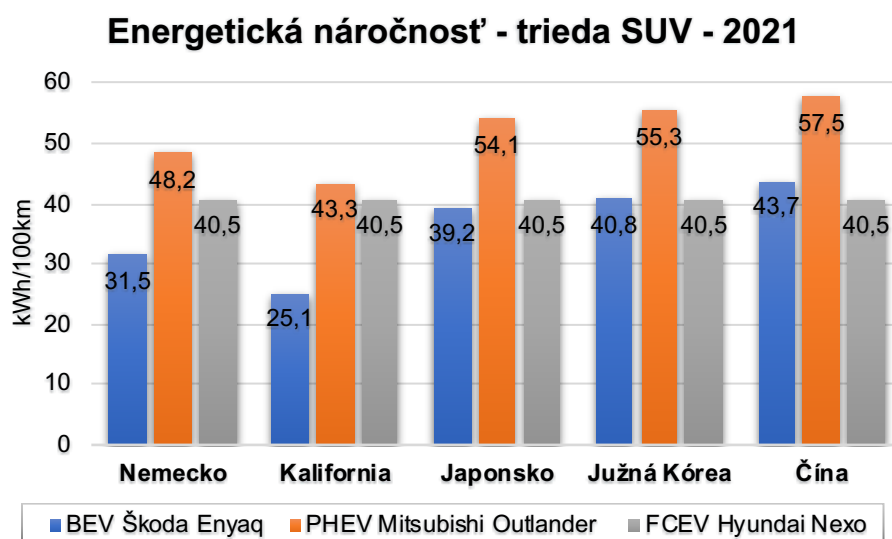
vyrobenej elektriny z fosílnych palív je viac ako 60 %, ekologickejšou možnosťou je v súčasnosti prevádzka vodíkového automobilu. Prevádzka plug-in hybridného vozidla bola vo výpočtoch z pohľadu emisnej náročnosti vyhodnotená ako najhoršia.

Ak by sa naplnil predpoklad podielu výroby zeleného vodíka v roku 2050, najekologickejším druhom vozidiel by bol vodíkový elektromobil. K odhadovanej emisnej náročnosti FCEV sa približujú batériové elektromobily prevádzkované v Nemecku a Kalifornii.

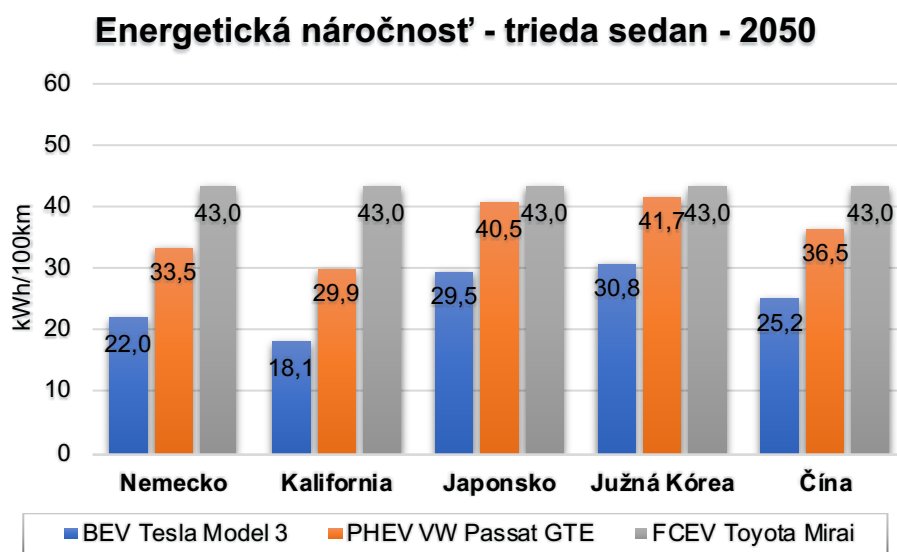
6.2 Porovnanie z pohľadu energetickej náročnosti



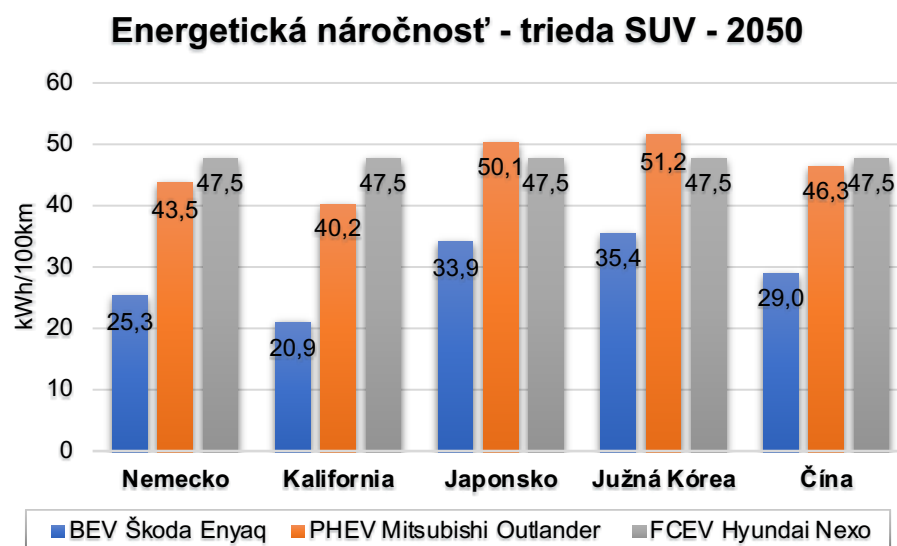
Obr. 6.5 Celková energetická náročnosť' modelov v triede sedan, rok 2021.



Obr. 6.6 Celková energetická náročnosť' modelov v triede SUV, rok 2021.



Obr. 6.7 Predpokladaná energetická náročnosť modelov v triede sedan, rok 2050.



Obr. 6.8 Predpokladaná energetická náročnosť modelov v triede SUV, rok 2050.

6.2.1 Diskusia výsledkov energetickej náročnosti

Z grafov vyplýva, že z pohľadu energetickej náročnosti je prevádzka batériových elektromobilov najmenej náročná. V súčasnosti je v Nemecku spotreba primárnej energie pre pohon BEV o 34 % menej energeticky náročná ako pre pohon vodíkového automobilu (trieda sedan). V Kalifornii je rozdiel ešte výraznejší a to o 68 %. Tento rozdiel sa znižuje v krajinách s vyšším podielom vyrobenej elektriny z fosílnych palív, kde prevádzka BEV a FCEV je takmer identická, ba dokonca v Číne a v Južnej Kórei je prevádzka batériového elektromobilu energeticky náročnejšia ako prevádzka vozidla na vodík. V Číne je o 8 % energeticky náročnejšie prevádzkovať elektromobil značky Škoda Enyaq ako vodíkový automobil Hyundai Nexa. Plug-in hybridné vozidlá sú podľa výpočtov energeticky najnáročnejšie. Jedinú výnimku môžeme sledovať

v Kalifornii, kde spotreba primárnej energie pre pohon PHEV je o 10 % menej náročná, ako pre pohon FCEV.

Je zaujímavé pozorovať predpoklad energetickej náročnosti pre vodíkové automobily. Za podmienok, aké boli použité vo výpočtoch, by v roku 2050 mali v triede sedan najvyššiu energetickú náročnosť. Je to spôsobené tým, že výroba zeleného vodíka je energeticky náročnejšia ako výroba šedého. Pre Nemecko by spotreba primárnej energie pre pohon vodíkového vozidla bola dvakrát viac energeticky náročná ako pre pohon BEV. V Kalifornii, kde by v roku 2050 mali získavať 90 % energie z OZE, by to predstavovalo až 130 % a v krajinách Japonsko, Južná Kórea a Čína by tento rozdiel predstavoval okolo 40 % v prospech batériových elektromobilov.

7 Porovnanie pohonov a technické výzvy do budúcnosti

7.1 Batériové elektromobily

- **Výhody**

Hlavnou výhodou elektrických automobilov je, že počas jazdy nevytvárajú žiadne lokálne emisie – vhodné riešenie do veľkomiest, ktorých klíma je z veľkej časti ovplyvnená výfukovými plynmi z automobilov so spaľovacím motorom. Vhodným príkladom je čínske mesto Šen-Čen, ktoré kvôli lepšej klíme v meste prevádzkuje 16 000 elektrických autobusov a 22 000 elektrických taxíkov.^[60] Ďalšou výhodou je možnosť výroby energie, potrebnej na pohon z obnoviteľných zdrojov. Praktickým využitím je inštalácia domácej fotovoltaickej elektrárne, s ktorou si dokážeme dobiť akumulátor bez ďalších poplatkov výrobcovi energie. Výhodou elektromobilov je aj menej častý servis, s čím by mali byť spojené nižšie náklady na prevádzku. Ako bolo spomenuté v kapitole 2.3, elektromotor obsahuje oveľa menej pohyblivých dielov ako spaľovací motor, takisto nepracuje v tak vysokých teplotách, čo pozitívne vplyva na životnosť. Ďalej EV obsahujú menej kvapalín, ktoré treba pravidelne vymieňať, či dopĺňať. Vďaka funkcii rekuperačného brzdenia a s tým súvisiacim predĺženým intervalom opotrebovania brzd vydrží brzdová sústava v elektromobile zvyčajne dlhšie ako v klasickom vozidle so spaľovacím motorom. Výhodami sú takisto dynamické zrýchlenie, dobré jazdné vlastnosti, dobíjanie akumulátora pri brzdení, či vysoká bezpečnosť vozidla. V čase písania bakalárskej práce sú výhodou aj daňové úľavy pri kúpe elektromobilu, bezplatné diaľničné známky, vyhradené jazdné pruhy, štátne dotácie a iné. Posledne spomenuté výhody sú v každom štáte iné a časom sa môžu zmeniť.

- **Nevýhody**

Najväčšou nevýhodou elektromobilov je kombinácia kratšieho dojazdu (v priemere 350 kilometrov)^[2] a času, potrebného na dobitie akumulátora, ktorý sa pohybuje v rozmedzí od niekoľkých desiatok minút až po niekoľko hodín. Dĺžka nabíjania závisí od viacerých faktorov – tie najhlavnejšie sú nabíjací výkon, kapacita batérie a miera vybitia. Nerozvinutá sieť dobíjacích staníc v určitých regiónoch je takisto nevýhodou. Ďalším nedostatkom je vyššia vstupná investícia pri kúpe takéhoto vozidla.

- **Technické výzvy**

Jednou z najväčších výziev do budúcnosti je zrýchlenie nabíjania a zvýšenie energetickej hustoty akumulátorov a tým predĺženie dojazdu. Je to problém hlavne pri dlhších trasách, prevyšujúcich niekoľko stoviek kilometrov, kedy nechceme strácať hodiny času nabíjaním, avšak krátka prestávka neprevyšujúca pol hodinu je príjemným oddychom a pre bezpečnosť jazdy aj nutným úkonom. Ďalšou technickou výzvou, ktorá sa začína objavovať v nových modeloch, je inštalácia obojsmerného nabíjania. Táto technológia umožňuje aby akumulátor vozidla slúžil ako medziúložisko energie z domáceho

solárneho systému alebo ako záložný zdroj pre napájanie domácnosti v prípade výpadku prúdu. Ďalšími technickými zlepšeniami môže byť inštalácia solárnych panelov na strechu elektromobilu, ktorý bude schopný dobíjať akumulátor zo slnečného žiarenia alebo bezdrôtové nabíjanie.

7.2 Plug-in hybridné vozidlá

- **Výhody**

Výhodou plug-in hybridných vozidiel je ich všestrannosť. Môžu byť využívané ako bezemisné elektromobily na dopravu do práce a späť na dennej báze, ale aj ako vozidlá na dlhší dojazd kedy je aktivovaný spaľovací motor. Výhodami sú tiež nižšia spotreba benzínu alebo nafty, ale aj menšie náklady ak sa automobil využíva denne na krátke vzdialenosti.

- **Nevýhody**

Plug-in hybridné automobily sú konštrukčne zložitejšie ako len tie so spaľovacím motorom. Veľkou nevýhodou je neefektivita pohonu, ktorý práve nepracuje. Preto nie sú veľmi výhodné pre užívateľov, ktorí jazdia dlhšie trasy – v čase pohonu spaľovacím motorom musí automobil odvieť celé ústrojenstvo elektrického pohonu (váha navyše = vyššia spotreba), ktorý má v tom čase nulovú efektivitu. Ďalšou výraznou nevýhodou je problémová údržba – potreba udržiavať technicky v poriadku súčasne dva typy pohonu.

- **Technické výzvy**

Všetky technické výzvy spomenuté pre batériové elektromobily, môžu byť aplikované aj pre plug-in hybridné vozidlá.

7.3 Vodíkové automobily

- **Výhody**

Automobily poháňané vodíkom neprodujú lokálne emisie, jediná odpadová látka je voda. Veľkou výhodou oproti BEV je rýchlosť doplnenia energie – vodík sa do auta natankuje za približne 5 minút a dojazd vozidla je 550-650 km.^[31] Na rozdiel od BEV, dojazd vozidla sa nezhoršuje pri klesajúcej teplote okolia. Ďalšou výhodou je nižšia celková váha vozidla, keďže automobil nedisponuje veľkými a ťažkými batériami. Tento aspekt môže byť kľúčový v nákladnej doprave, kde je celková váha (ťaháč + náves + váha tovaru) limitovaná. Čím vyššiu má ťahač váhu, tým menej tovaru odvezie.

- **Nevýhody**

Veľkou nevýhodou je získavanie vodíka – v súčasnosti stále dominuje parná reformácia zemného plynu. Ďalšou nevýhodou je hustota vodíka a tým spojené

skladovanie. Jeden kilogram vodíka pri tlaku 1 bar a teplote 20 °C má objem 11 934 litrov. Pri využití v osobných automobiloch je potrebné ho stlačiť na vysoké tlaky – konkrétne 600-700 barov. Pri týchto tlakoch má 1kg vodíka objem 25,7 litra. V prípade autobusovej dopravy sa vodík stláča na 350 barov – objem 1 kg vodíka je v tomto prípade 42,7 litra.^[27] Nádrže musia odolávať vysokým tlakom, a tak sú vyrobené z kvalitných materiálov ako sú napr. uhlíkové kompozitné materiály. To však predražuje výrobu vozidla. Stláčanie vodíka tiež znižuje jeho efektívnosť kvôli prevádzke výkonných kompresorov. Ďalšími nevýhodami vodíkového pohonu sú nerozvinutá infraštruktúra čerpacích staníc a ich investičná náročnosť, ktorá je technicky aj materiálovo oveľa komplikovanejšia v porovnaní s dobíjacou stanicou, či benzínovou pumpou. Ďalšie nevýhody sú nerozvinutá sieť servisov, malý výber dostupných modelov alebo komplikovanejšia stavba vozidla oproti BEV.

- **Technické výzvy**

Najväčšou technickou výzvou do budúcnosti je zefektívnenie výroby zeleného vodíka z OZE. Využitím nákladovo efektívnej technológie za pomoci elektrolýzy by viedlo k výraznému zníženiu emisií v rôznych odvetviach hospodárstva – od výroby tepla, elektroenergetiky až po dopravu. Ďalšou technickou výzvou je vybudovanie dostatočnej infraštruktúry – servisov a čerpacích staníc, ktoré musia vodík bezpečne uskladniť. Práve skladovanie je veľmi náročný proces. Kombinácia vysokých tlakov v nádržiach a krehnutie kovu za prítomnosti vodíka navyšuje materiálú náročnosť nádrží, čo v konečnom dôsledku navyšuje cenu automobilov a budovania čerpacích staníc. Vynájdением dostatočne pevných a zároveň finančne dostupných materiálov sa tento proces budovania radikálne zrýchli. Ďalšou technickou výzvou je zvýšenie bezpečnosti pri prevádzke vodíkových vozidiel, skladovaní vodíka, či pri jeho manipulácii.

8 Závěr

Táto bakalárska práca bola zameraná na porovnanie batériových elektromobilov s vozidlami poháňanými na vodík pomocou palivových článkov, a to z pohľadu energetickej náročnosti. Ku väčšej komplexnosti témy boli do práce zahrnuté aj plug-in hybridné vozidlá, ktoré vytvárajú menšie množstvo lokálnych emisií v porovnaní s vozidlami čisto so spaľovacím motorom. V úvode práce boli spomínané typy pohonov vozidiel všeobecne predstavené, bola stručne opísaná ich história, ale aj základný princíp fungovania pohonu.

K samotnému výpočtu energetickej náročnosti predchádzal výber krajín, v ktorých sa skúmala prevádzka jednotlivých pohonov. Z praktického hľadiska bola vybraná skupina zemí, v ktorých je vybudovaná aspoň základná infraštruktúra vodíkových čerpacích staníc. Túto podmienku spĺňali Nemecko, Kalifornia, Japonsko, Južná Kórea a Čína. Energetický mix – podiel jednotlivých zdrojov na výrobe elektriny sa značne líšil, čo v konečnom dôsledku zvýraznilo rozdiely vo výpočtoch. Ďalej boli predstavené ďalšie elementárne údaje dôležité pre nasledujúce výpočty, ako sú účinnosť jednotlivých elektrární, ich energetická náročnosť na výrobu jednej kilowatt hodiny a priemerné emisie CO₂ pri výrobe. Taktiež bola predstavená energetická a emisná náročnosť vodíka podľa veľkosti uhlíkovej stopy pri výrobe.

Z výsledkov sa dá všeobecne konštatovať, že energeticky a emisne sú najmenej náročné elektromobily v krajinách s vyšším podielom výroby elektriny z obnoviteľných zdrojov, ako je napríklad Kalifornia alebo Nemecko. K týmto výsledkom sa približujú aj vodíkové automobily, ktoré však doplácajú na vysoký podiel výroby vodíka z fosílnych palív. V krajinách s nižším podielom výroby elektriny z obnoviteľných zdrojov, sú emisne výhodnejšie vodíkové automobily. Z pohľadu energetickej náročnosti sú v týchto krajinách FCEV porovnateľné s BEV. V krajinách s vyšším podielom elektriny vyrobenej z OZE sú energeticky výhodnejšie opäť batériové elektromobily.

Do celkového porovnania batériových elektromobilov a automobilov poháňaných na vodík je treba zvážiť celú radu výhod a nevýhod, ktoré každé z týchto pohonov ponúka. Batériové elektromobily majú značný náskok pred vodíkovými automobilmi, či už v oblasti vývoja, vybudovanej infraštruktúry alebo dopytu. Napriek všetkým diskusiám a súpereniu medzi vodíkom a akumulátorom v automobiloch, si osobne myslím, že spoločnosť by vodíkové elektromobily nemala brať ako konkurenciu k tým batériovým, ale skôr ako synergiu týchto dvoch pohonov, z ktorej v budúcnosti môžeme prosperovať zníženým množstvom CO₂ vo vzduchu. Subjektívne si myslím, že vodíkové palivové články sa v budúcnosti budú využívať v nákladnej, lodnej a leteckej doprave, kde táto technológia prevyšuje výhodami, hlavne z hľadiska rýchleho dočerpania paliva a pomeru hmotnosti k dojazdu. Batériové elektromobily budú prevažovať v osobnej doprave, a to najmä vo veľkých mestách a prímestských oblastiach.

Je nutné poznamenať, ako bolo vysvetlené v práci, že výroba vodíka z fosílnych zdrojov je síce účinnejšia, avšak produkuje viac emisií. Na druhej strane, výroba zeleného vodíka elektrolýzou vody pri využití OZE je ekologickejšia, avšak viac energie je stratenej pri menej účinnej výrobe. Je tu otázka, či vzácnu a zložito vyrobenú energiu z obnoviteľných zdrojov premieňať s nízkou účinnosťou v zelený vodík

a nevyužití ju jinak. Vodík má však výhodu, že sa relativne dobre skladuje. Tento proces má význam v prípadoch, kedy máme energie nadbytok a musíme ju uskladniť na neskôr. Praktický príklad je solárna elektrárňa v letných mesiacoch, kedy je dostatok slnečných lúčov a odber je nižší ako príjem energie. Potom má takáto výroba zmysel a neskoršie využitie vodíka nemusí byť iba v doprave, ale aj v energetike či priemysle.

Práca nadväzovala na bakalársku prácu pána Bochníčka, ktorá sa zaoberala energetickou náročnosťou plug-in hybridov a elektromobilov v závislosti na mieste prevádzky. Ďalším rozvojom tejto bakalárskej práce, by mohlo byť komplexné posúdenie energetickej náročnosti batériových a vodíkových elektromobilov, kedy by vo výpočtoch figurovali aj náklady spojené s ťažbou a spracovaním daných surovín. Ďalším rozvojom témy by mohlo byť porovnanie energetickej náročnosti vodíkových automobilov poháňaných vodíkom, ktorý bol vyrobený na mieste čerpacej stanice pri nižšej účinnosti alebo vo vzdialenej stanici s vyššou účinnosťou avšak potrebou pre transport k zákazníkovi.

9 Zoznam použitých zdrojov

- [1] HARARI, Yuval Noah. *Sapiens: stručná história ľudstva*. Přeložil Zuzana JÁNSKA. Bratislava: Aktuell, 2018. ISBN 978-80-89873-06-7.
- [2] PALTHE, Maarten. JATO Study: BEV average range decreases under WLTP. *Jato.com* [online]. Uxbridge: Maarten Palthe, 2019 [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: <https://www.jato.com/jato-study-bev-average-range-decreases-under-wltp/>
- [3] KUBEŠ, Filip. *METODY SNIŽOVÁNÍ SPOTŘEBY MODERNÍCH VOZIDEL* [online]. Brno, 2012 [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53087. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství. Vedoucí práce Josef Štětina.
- [4] KANE, Mark. Norway: Massive EV Sales Record In December: Tesla Model 3 Beats VW ID.3. *Insideevs.com* [online]. Mark Kane, 2021 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/464304/norway-ev-sales-record-december-2020/>
- [5] Electric cars rise to record 54% market share in Norway in 2020. In: *Reuters.com* [online]. Oslo: Victoria Klesty, 2021 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.reuters.com/article/us-autos-electric-norway-idUSKBN29A0ZT>
- [6] Electric motor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_motor
- [7] Tesla, Inc. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla,_Inc.
- [8] Thomas Parker (inventor). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Parker_\(inventor\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Parker_(inventor))
- [9] WORKMAN, Josie. European demand for electrified vehicles continues in June. *Jato.com* [online]. Uxbridge: Josie Workman, 2020 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://www.jato.com/european-demand-for-electrified-vehicles-continues-in-june/>
- [10] GENO, Elliot. Tesla Model 3 Feature Requests. In: *Medium.com* [online]. Cork: VeraSafe Ireland, 2018 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://medium.com/@elliogeno/model-3-feature-requests-5a9e329e018f>
- [11] ŠKODA ENYAQ iV 60. In: *Autoibuy.com* [online]. Hradec Králové: AUTOiBUY, 2021 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z:

- <https://www.autoibuy.com/skoda-enyaq/skoda-enyaq-iv-60-seda-quartz-metaliza/>
- [12] HILVERT, Juraj. *Výkladový slovník automobilizmu*. Bratislava: DLX Slovakia, 2007. ISBN 978-80-900972-8-5.
- [13] Fuel types of new cars: electric 10.5%, hybrid 11.9%, petrol 47.5% market share full-year 2020. *Acea.be* [online]. Brusel: European automobile manufactures association, 2021 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://www.acea.be/press-releases/article/fuel-types-of-new-cars-electric-10.5-hybrid-11.9-petrol-47.5-market-share-f>
- [14] Ferdinand Porsche as hybrid drive pioneer. *Porsche.de/museum* [online]. Stuttgart: Porsche [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://presskit.porsche.de/museum/en/2019/topic/exhibitions/cars/reconstruction-of-the-semper-vivus-hybrid-car-from-1900.html>
- [15] PONTES, Jose. 14% Of European Vehicle Sales Were Plugin Vehicle Sales In January! *Cleantechnica.com* [online]. Jose Pontes, 2021 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2021/02/27/14-of-european-vehicle-sales-were-plugin-vehicle-sales-in-january-5-6-were-full-electrics/>
- [16] VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. Brno: František Vlk, 2004. ISBN 80-239-1602-5.
- [17] FRYBERT, Jan. *Alternativní pohony*. Brno: Integrovaná střední škola automobilní, [2015]. ISBN 978-80-260-7548-6.
- [18] Volkswagen Passat GTE. In: <https://pod-point.com/> [online]. London: Pod Point, 2015 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://pod-point.com/guides/vehicles/volkswagen/2015/passat-gte>
- [19] Mitsubishi Outlander Plug-In Hybrid. In: <https://evchargeplus.com/> [online]. Oslo: EV Charge +, [2021] [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://evchargeplus.com/ev-specification/mitsubishi-outlander-plug-in-hybrid/>
- [20] ŠABLATURA, Jan. Auta na vodíkový pohon: jak fungují a proč by nás měla zajímat. *Vtm.zive.cz* [online]. Praha: CZECH NEWS CENTER, 2019 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://vtm.zive.cz/clanky/auta-na-vodikovy-pohon-jak-funguji-a-proc-by-nas-mela-zajimat/sc-870-a-201645/default.aspx>
- [21] Hydrogen. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen>

- [22] De Rivaz engine. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/De_Rivaz_engine
- [23] MÁRQUEZ, José Manuel Andújar. Fuel cells: history and updating. A walk along two centuries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2009, **2009**(9), 2309-2322 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109001336#!>
- [24] Palivový článek. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Palivov%C3%BD_%C4%8Dl%C3%A1nek
- [25] Slovensko vybuduje dve vodíkové čerpace stanice. In: *Pravda.sk* [online]. Bratislava: Pravda, 2021 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://auto.pravda.sk/doprava/clanok/578280-slovensko-postavi-tento-rok-dve-vodikove-cerpace-stanice/>
- [26] FILOVÁ, Dagmar. *Produkce vodíku s využitím bakterií rodu Clostridium* [online]. Brno, 2013 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/25521>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. Ústav chemie potravin a biotechnologií. Vedoucí práce Bohuslav Rittich.
- [27] Prof. Matolín: Vodík - palivo pro udržitelnou energetiku. In: *Youtube.com* [online]. CVUT FEL, 2021 [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=spVuaexlO5k>
- [28] How does a hydrogen fuel cell work? (AKIO TV). In: *Youtube.com* [online]. 2018 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=9zgx-PIDEKA>
- [29] Toyota's TRD: Mirai star. In: *Paultan.org* [online]. Shah Alam: Paultan, 2020 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://paultan.org/2020/12/29/toyotas-trd-modellista-reveal-exhibits-for-virtual-tokyo-auto-salon-custom-gr-yaris-supra-mirai-star/>
- [30] 2020 Hyundai NEXO Blue. In: *Kbb.com* [online]. Irvine: Kelley Blue Book, [2020] [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.kbb.com/hyundai/nexo/2020/blue/>
- [31] 2021 MIRAI: innovation is power. *Toyota.com* [online]. 2021 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.toyota.com/mirai/>
- [32] Comparative life-cycle greenhouse gas emissions over ten year lifetime of an average mid-size car by powertrain, 2018. In: *lea.org* [online]. IEA, 2018, 2020 [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/comparative-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-over-ten-year-lifetime-of-an-average-mid-size-car-by-powertrain-2018>

- [33] CO2 emissions from cars: facts and figures. In: *Europarl.europa.eu* [online]. 2019 [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics>
- [34] 2019 Total System Electric Generation. In: *Energy.ca.gov* [online]. Sacramento: California Energy Commission [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.energy.ca.gov/data-reports/energy-almanac/california-electricity-data/2019-total-system-electric-generation>
- [35] Share of electricity production by source: Germany, Japan, South Korea, China. *Ourworldindata.org* [online]. Oxford: Our world in data, 2019 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: https://ourworldindata.org/grapher/share-elec-by-source?country=~OWID_WRL
- [36] Chart: Why Battery Electric Vehicles Beat Hydrogen Electric Vehicles Without Breaking A Sweat. In: *Cleantechnica.com* [online]. Zachary Shahan, 2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2021/02/01/chart-why-battery-electric-vehicles-beat-hydrogen-electric-vehicles-without-breaking-a-sweat/>
- [37] European Union Energy Label. In: *Tesla.com* [online]. 2021 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: https://www.tesla.com/en_EU/support/european-union-energy-label
- [38] Passat GTE Variant. In: *Volkswagen-newsroom.com* [online]. [2019] [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/passat-gte-variant-3538>
- [39] Ceny a sazby elektriny pre domácnosti. In: *Sse.sk* [online]. 2021 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: https://www.sse.sk/domacnosti/elektrina/sadzby?page_id=5521
- [40] Production of hydrogen. ABRAHAM, Martin A. *Encyclopedia of sustainable technologies: earth systems and environmental sciences* [online]. Ohio: Elsevier, 2017, s. 293-304 [cit. 2021-04-07]. ISBN 978-0-12-804792-7. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095489101174>
- [41] Výroba zeleného vodíku: rozhovor s Dr. Alešem Douckem. In: *Youtube.com* [online]. Jan Staněk, 2021 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=n0wzihJWdU>
- [42] 50 shades of (grey and blue and green) hydrogen. In: *Energy-cities.eu* [online]. Sara Giovannini, 2020 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://energy-cities.eu/50-shades-of-grey-and-blue-and-green-hydrogen/>

- [43] SPATH, Pamela L. Life cycle assessment of renewable hydrogen production via wind/electrolysis. *Nrel.gov* [online]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2004 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35404.pdf>
- [44] GROUSET, Didier a Cyrille RIDART. Lowering energy spending together with compression, storage, and transportation costs for hydrogen distribution in the early market. *Hydrogen supply chains: design, deployment and operation* [online]. 1. Catherine Azzaro-Pantel, 2018, s. 207-270 [cit. 2021-04-19]. ISBN 978-0-12- 811197-0. Dostupné z: https://hal-mines-albi.archives-ouvertes.fr/hal-01877835/file/VaBHyoGaz3_2.1.S05_vC_proofed_2018_05_20_Hydrogen_Supply_Chain_Book_Chap6.pdf
- [45] Výroba vodíka bez zemného plynu bude neefektivna. In: *Slovgas.sk* [online]. Bratislava: Peter Jurkovič, 2020 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.slovgas.sk/analyzy/vyroba-vodik-a-bez-zemneho-plynu-bude-neefektivna/>
- [46] Average operating heat rate for selected energy sources. *Eia.gov* [online]. Washington: U.S. Energy Information Administration, 2019 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: https://www.eia.gov/electricity/annual/html/epa_08_01.html
- [47] BOCHNÍČEK, Ondřej. *Skutečná energetická náročnost plug-in hybridů a elektromobilů v závislosti na místě provozu vozidla*. Brno, 2015. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Jan Fišer.
- [48] Hydrogen economy. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_economy
- [49] NOUSSAN, Michel, et al. The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective. *Sustainability*, 2021, 13.1: 298.
- [50] Hydrogen economy. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_economy
- [51] What is carbon neutrality and how can it be achieved by 2050? In: *Europarl.europa.eu* [online]. 2020 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190926STO62270/what-is-carbon-neutrality-and-how-can-it-be-achieved-by-2050>
- [52] Global Energy Review: CO2 Emissions in 2020. In: *iea.org* [online]. Paris: International Energy Agency, 2021 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020>

- [53] KIRSCHBAUM, Erik. Germany to close all 84 of its coal-fired power plants, will rely primarily on renewable energy. *Latimes.com* [online]. El Segundo: Los Angeles Times, 2019 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: https://www.latimes.com/world/europe/la-fg-germany-coal-power-20190126-story.html?fbclid=IwAR2vC5awfwY4CT0rIozWdOVY3QQqh_SLYsih8uzqUYFAjIDHlwSqWSD4bEk
- [54] WEI, Max. *Building a Healthier and More Robust Future: 2050 Low-Carbon Energy Scenarios for California* [online]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2019 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://ww2.energy.ca.gov/2019publications/CEC-500-2019-033/CEC-500-2019-033.pdf>
- [55] Long-term energy strategy scenarios for South Korea: transition to a sustainable energy system. *Energy policy* [online]. 2019, **2019**(127), 425-437 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421518307936#t0005>
- [56] *Japan Climate Vision 2050: An energy future independent of nuclear power and fossil fuels* [online]. Tokyo: Kiko Network, [2014] [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.kikonet.org/wp/wp-content/uploads/2014/05/japan-climate-vision-2050-scenario-en.pdf>
- [57] China's renewable energy goals by 2050. *Environmental Development* [online]. 2016, **2016**(20), 83-90 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221146451630152X>
- [58] Hydrogen. In: *Bp.com* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/demand-by-fuel/hydrogen.html>
- [59] Umrechnungsfaktoren. *Energie-gedanken.ch* [online]. [2017] [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.energie-gedanken.ch/umrechnungsfaktoren/>
- [60] The City with 16,000 Electric Buses & 22,000 Electric Taxis. *Youtube.com* [online]. Fully Charged Show, 2021 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=0P7ftPLSMel>

10 Zoznam použitých symbolov a skratiek

el_{sp}	spotreba elektrickej energie na 100 kilometrov
em_{ice}	emisie vyprodukované spaľovacím motorom počas jazdy na 100 km
em_j	emisná náročnosť výroby elektriny z jadrových elektrární
Em_n	emisná náročnosť pohonu
em_r	emisná náročnosť výroby elektriny z ropy/ropných produktov
em_s	emisná náročnosť výroby elektriny zo solárnych elektrární
em_u	emisná náročnosť výroby elektriny z uhlia
em_{ve}	emisná náročnosť výroby elektriny z veterných elektrární
em_{vo}	emisná náročnosť výroby elektriny z vodných elektrární
em_{zp}	emisná náročnosť výroby elektriny zo zemného plynu
en	energetická náročnosť výroby elektriny
en_b	energetická náročnosť benzínu
en_j	energetická náročnosť výroby elektriny z jadrových elektrární
En_n	energetická náročnosť pohonu
en_r	energetická náročnosť výroby elektriny z ropy/ropných produktov
en_u	energetická náročnosť výroby elektriny z uhlia
en_{zp}	energetická náročnosť výroby elektriny zo zemného plynu
P_j	podiel jadrových elektrární na výrobe elektriny
P_{mv}	podiel výroby modrého vodíka
P_o	podiel ostatných zdrojov na výrobe elektriny
P_r	podiel ropy/ropných produktov na výrobe elektriny
P_s	podiel solárnych elektrární na výrobe elektriny
$P_{šv}$	podiel výroby šedého vodíka
P_u	podiel uhlia na výrobe elektriny
P_{ve}	podiel vodných elektrární na výrobe elektriny
P_{vo}	podiel vodných elektrární na výrobe elektriny
P_{zp}	podiel zemného plynu na výrobe elektriny
P_{zv}	podiel výroby zeleného vodíka
v_{sp}	spotreba vodíka na 100 kilometrov
AC	alternating current – striedavý elektrický prúd
AFC	alkaline fuel cell – alkalický palivový článok

BEV	battery electric vehicle – batériové elektrické vozidlo
CCS	carbon capture and storage – proces zachytávania a uskladňovania oxidu uhličitého z veľkých bodových zdrojov
CO ₂	oxid uhličitý, plyn podieľajúci sa na skleníkovom efekte
DC	direct current – jednosmerný elektrický prúd
e ⁻	elektrón
EPA	The US Environmental Protection Agency – Americká agentúra na ochranu životného prostredia
EROEI	energy returned on energy invested – energia získaná ku energii vloženej, pomer množstva využiteľnej energie získanej z určitého zdroja energie k množstvu energie, ktorú je potrebné vynaložiť na získanie energie z daného zdroja
EÚ	Európska únia
EV	electric vehicle - elektromobil
FCEV	fuel cell electric vehicle – vodíkové vozidlo s palivovými článkami
H ⁺	vodíkový kation, kladne nabitý ión vodíka
H ₂	molekulárny vodík
H ₂ O	voda
ICE	internal combustion engine – motor s vnútorným spaľovaním
napr.	napríklad
NASA	National Aeronautics and Space Administration – Národný úrad pre letectvo a vesmír, americká vládna agentúra
O ₂	molekulárny kyslík
obr.	obrázok
OZE	obnoviteľné zdroje energie
PHEV	plug-in hybrid electric vehicle – plug-in hybridné elektrické vozidlo
SMR	steam methane reforming – parná reformácia zemného plynu
SUV	sport utility vehicle – športovo-úžitkový automobil, automobil so zvýšenou karosériou, väčšinou pohonov všetkých kolies a väčšou priechodnosťou v teréne
tab.	tabuľka
t.j.	to jest
TTR	through the road – druh paralelného hybridného systému

tzv.

takzvané

η

středná účinnost elektrárny

11 Zoznam obrázkov

Obr. 2.1 Predaj BEV, PHEV a vozidiel so spaľovacím motorom za rok 2020 v Nórsku. ^[5]	12
Obr. 2.2 Dobový elektromobil navrhnutý Thomasom Parkerom, 1884. ^[8]	13
Obr. 2.3 Všeobecná schéma pohonu BEV.....	14
Obr. 2.4 Tesla Model 3. ^[10]	15
Obr. 2.5 Škoda Enyaq iV. ^[11]	15
Obr. 3.1 Všeobecná schéma pohonu PHEV.....	17
Obr. 3.2 Volkswagen Passat GTE. ^[18]	17
Obr. 3.3 Mitsubishi Outlander PHEV. ^[19]	18
Obr. 4.1 Všeobecná schéma pohonu FCEV s palivovým článkom.....	21
Obr. 4.2 Schéma palivového článku na vodík. ^[28]	22
Obr. 4.3 Toyota Mirai II. generácie. ^[29]	22
Obr. 4.4 Hyundai Nexa. ^[30]	23
Obr. 5.1 Emisie z dopravy v EÚ – upravené. ^[33]	24
Obr. 5.2 Efektivita jednotlivých pohonov – upravené. ^[36]	26
Obr. 5.3 Elektrolýzer s príkonom 7 kW, pripojený na fotovoltickú elektrárňu – príklad lokálnej výroby vodíka pomocou OZE (pilotný projekt výroby zeleného vodíka, firma ÚJV Řež, Česká republika). ^[41]	28
Obr. 5.4 Odhadované množstvo CO ₂ pri výrobe vodíka. ^{[42][43][44]}	28
Obr. 6.1 Celková emisná náročnosť modelov v triede sedan, rok 2021.....	34
Obr. 6.2 Celková emisná náročnosť modelov v triede SUV, rok 2021.....	34
Obr. 6.3 Predpokladaná emisná náročnosť modelov v triede sedan, rok 2050.....	35
Obr. 6.4 Predpokladaná emisná náročnosť modelov v triede SUV, rok 2050.....	35
Obr. 6.5 Celková energetická náročnosť modelov v triede sedan, rok 2021.....	36
Obr. 6.6 Celková energetická náročnosť modelov v triede SUV, rok 2021.....	36
Obr. 6.7 Predpokladaná energetická náročnosť modelov v triede sedan, rok 2050.....	37
Obr. 6.8 Predpokladaná energetická náročnosť modelov v triede SUV, rok 2050.....	37

12 Zoznam tabuliek

Tab. 2.1 Základné informácie predstavených BEV.....	15
Tab. 3.1 Základné informácie predstavených PHEV.....	18
Tab. 4.1 Základné informácie predstavených FCEV.....	23
Tab. 5.1 Energetický mix – podiel jednotlivých zdrojov na výrobe elektriny [%]. ^{[34][35]}	25
Tab. 5.2 Cena za 100 km [€]. ^{[37][38][39]}	26
Tab. 5.3 Elektrina - stredná účinnosť, energetická náročnosť a priemerné emisie. ^{[46][47]}	29
Tab. 5.4 Vodík - energetická náročnosť na výrobu, kompresiu, skladovanie a priemerné emisie. ^{[42][43][44]}	29
Tab. 5.5 Emisná náročnosť jednotlivých vozidiel [g CO ₂ /100km] – rok 2021....	30
Tab. 5.6 Odhadovaný energetický mix v roku 2050 – podiel jednotlivých zdrojov na výrobe elektriny [%]. ^{[53][54][55][56][57]}	32
Tab. 5.7 Odhadovaná emisná náročnosť jednotlivých vozidiel [g CO ₂ /100km] – rok 2050. ^[58]	32
Tab. 5.8 Energetická náročnosť jednotlivých vozidiel – potrebné množstvo vyrobenej energie v kWh na prejdeň vzdialenosti 100 km [kWh/100km] – rok 2021. ^[59]	32
Tab. 5.9 Odhadovaná energetická náročnosť jednotlivých vozidiel [kWh/100km] – rok 2050.	33