

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů



Diplomová práce

Porovnání emisí spalovacího motoru a elektromotoru

Autor práce: Bc. Jakub Svoboda

Vedoucí práce: prof. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jakub Svoboda

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Porovnání emisí spalovacího motoru a elektromotoru

Název anglicky

Comparison of combustion engine and electric motor emissions

Cíle práce

Cílem diplomové práce je popsat produkci emisí u vozidel s pohonem spalovacím motorem a elektromotorem. Na základě popisu pak porovnat dopad těchto dvou pohonů na životní prostředí.

Metodika

První část práce bude řešena literárním rozбором popisu konstrukce a tvorby emisí vozidel s pohonem spalovacím motorem a elektropohonem a následně bude realizována bilance produkce emisí v rámci výroby, provozu a následné likvidaci vozidel.

Osnova:

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu (složky emisí, spalovací motor a elektromotor, dopravní automobily a ostatní stroje poháněné elektromotorem místo spalovacího motoru)
3. Cíl práce
4. Metodika práce
5. Výsledky (bilance produkce emisí v různých etapách života vozidel s různým pohonem)
6. Závěr

Doporučený rozsah práce

50 – 60

Klíčová slova

emise, spalovací motor, elektromotor

Doporučené zdroje informací

- EBEL, A. – FRIEDRICH, R. – RODHE, H. *Tropospheric modelling and emission estimation : chemical transport and emission modelling on regional, global, and urban scales*. Berlin ; New York: Springer, 1997. ISBN 3540631690.
- HALDERMAN, J. D. – LINDER, J. *Automotive fuel and emissions control systems James D. Halderman, Jim Linder*. Upper Saddle River, N.J.: Pearson/Prentice Hall, 2006. ISBN 013110442.
- HROMÁDKO, J. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony : komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
- Předpisy, vyhlášky a firemní literatura
- REMEK, B. *Automobil a spalovací motor : historický vývoj*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-3538-2.
- VLK, F. *Koncepce motorových vozidel : koncepce vozidel, alternativní pohony, komfortní systémy, řízení dynamiky, informační systémy*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000. ISBN 80-238-5276-0.

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

Elektronicky schváleno dne 12. 1. 2023

prof. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 3. 2023

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 30. 05. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci „Porovnání emisí spalovacího motoru a elektromotoru“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 16.03.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu prof. Ing. Martinu Pexovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při tvorbě této diplomové práce. Děkuji také své manželce, rodičům a přátelům za podporu po celou dobu studia.

Porovnání emisí spalovacího motoru a elektromotoru

Abstrakt

Cílem diplomové práce bylo porovnat emise vznikající během celého životního cyklu automobilu se spalovacím motorem a elektromobilu. Práce je složena z teoretické, praktické a závěrečné části. V teoretické části jsou specifikovány environmentální (dopad na životní prostředí), technologické a regulační rozdíly (emisní dohody a nařízení) spalovacích a elektrických motorů. Dále jsou popsány oblasti, kde jsou využívány, popř. v budoucnu mohou být využívány, automobily a další stroje poháněné elektromotorem namísto spalovacího motoru. V praktické části jsou vypočteny emise vznikající v daných fázích životního cyklu vozidla, z vypočtených dat a dostupných informací byla poté vytvořena emisní komparace obou typů pohonů. V závěrečné části je uvedeno shrnutí dosažených výsledků.

Klíčová slova: emise, oxid uhličitý, vozidla, množství CO₂, elektromobil, pevné částice, spalovací motor, elektromotor, životní cyklus, limity, bilance, norma

Comparison of combustion engine and electric motor emissions

Abstract

The aim of the thesis was to compare the emissions generated throughout the entire life cycle of a combustion engine vehicle and an electric vehicle. The thesis consists of theoretical and practical parts, and a conclusion. The theoretical part specifies environmental (the impact on the environment), technological and regulatory differences (emission agreements and regulations) between combustion and electric engines. Furthermore, selected areas where vehicles and other machines powered by electric motors are currently utilized or may be utilized in the future instead of combustion engines, are described. In the practical part, emissions generated in various phases of the vehicle life cycle are calculated, and based on the calculated data and available information, was then created an emission comparison of both types of propulsion. In the conclusion, there is a summary of the achieved results.

Keywords: emission, carbon dioxide, vehicles, CO₂ quantity, electric vehicle, solid particles, combustion engine, electric motor, life cycle, limits, balance, regulation

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam použitých zkratek | 1 |
| 1 Úvod..... | 2 |
| 2 Rozbor současného stavu..... | 3 |
| 2.1 Emise..... | 3 |
| 2.1.1 Emise při výrobě aut | 4 |
| 2.1.2 Emise výfukových plynů | 5 |
| 2.1.3 Emisní dohody a nařízení | 5 |
| 2.1.3.1 Pařížská dohoda..... | 6 |
| 2.1.3.2 Evropská unie | 7 |
| 2.1.3.3 USA | 8 |
| 2.1.3.4 Čína..... | 9 |
| 2.2 Rozdíly mezi spalovacími motory a elektromotory | 10 |
| 2.2.1 Spalovací motor | 10 |
| 2.2.1.1 Princip fungování spalovacího motoru..... | 13 |
| 2.2.1.2 Vznětový motor | 15 |
| 2.2.1.3 Zážehový motor | 16 |
| 2.2.2 Elektromotor | 16 |
| 2.3 Dopad na životní prostředí | 21 |
| 2.4 Automobily a další stroje poháněné elektromotorem místo spalovacího motoru .. | 22 |
| 2.4.1 EDumper Komatsu HD 605-7 | 22 |
| 2.4.2 Automobilová flotila rozvozové služby | 23 |
| 2.4.3 Elektro-mobilní taxi | 24 |
| 2.4.4 Monarch Tractor | 24 |
| 3 Cíl práce..... | 25 |
| 4 Metodika | 26 |
| 4.1 Emise automobilů se spalovacím motorem..... | 26 |
| 4.1.1 Emise z výroby automobilů se spalovacím motorem | 27 |
| 4.1.2 Emise z výroby paliva..... | 28 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.1.3 | Emise z provozu automobilů se spalovacím motorem | 30 |
| 4.1.3.1 | Emise ze spalování paliva | 30 |
| 4.1.3.2 | Emise z brzd a pneumatik automobilů se spalovacím motorem | 32 |
| 4.1.3.3 | Emise z údržby automobilů se spalovacím motorem | 33 |
| 4.1.4 | Emise z likvidace a recyklace automobilů se spalovacím motorem | 33 |
| 4.2 | Emise elektromobilů | 35 |
| 4.2.1 | Emise z výroby elektromobilů | 35 |
| 4.2.2 | Emise z výroby baterií | 37 |
| 4.2.3 | Emise z provozu elektromobilů | 38 |
| 4.2.3.1 | Emise z brzd a pneumatik elektromobilů | 38 |
| 4.2.3.2 | Emise z výroby elektřiny na nabíjení | 38 |
| 4.2.3.3 | Emise z údržby elektromobilů | 40 |
| 4.2.4 | Emise z likvidace a recyklace elektromobilů včetně baterií | 43 |
| 5 | Výsledky | 44 |
| 5.1 | Emise z výroby vozidel | 44 |
| 5.2 | Emise z provozu vozidel | 44 |
| 5.3 | Emise z údržby vozidel | 46 |
| 5.4 | Emise z likvidace a recyklace | 46 |
| 5.5 | Komparace emisí z elektromobilů a automobilů se spalovacím motorem | 47 |
| 6 | Závěr | 50 |
| | Seznam použitých zdrojů | 51 |
| | Seznam použitých obrázků | 58 |
| | Seznam použitých tabulek | 59 |

Seznam použitých zkratk

| | |
|------------------|--|
| AI | umělá inteligence |
| BEV | elektromobil |
| CNG | stlačený zemní plyn |
| DoD | hloubka vybíjení |
| DPF | filtr pevných částic |
| DÚ | dolní úvrat' |
| EGR | recirkulace výfukových plynů |
| EPA | Agentura pro ochranu životního prostředí v USA |
| HC | nespálené uhlovodíky |
| HCNG | směs stlačeného zemního plynu s vodíkem |
| HÚ | horní úvrat' |
| ICEV | průměrné motorového vozidlo se spalovacím motorem |
| LPG | zkapalněný ropný plyn |
| NHTSA | Národní úřad pro bezpečnost silničního provozu v USA |
| NMHC | nemetanové uhlovodíky |
| NO _x | oxidy dusíku |
| PM | pevné částice |
| UNFCCC | rámcová úmluva OSN o změně klimatu |
| VOS _c | těkavé organické sloučeniny |
| WLTP | celosvětové zkušební postupy pro vozidla |

1 Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na jedno z nejdiskutovanějších témat současného automobilového průmyslu – zabývá se rozdíly mezi spalovacími a elektrickými motory.

Příznivci spalovacích motorů oceňují jejich historii a dostupnost paliva, zároveň poukazují na neustálý vývoj z hlediska účinnosti motoru a snižování emisí. Existuje řada důležitých nařízení a smluv souvisejících s emisemi a životním prostředím, díky kterým se emisní limity neustále zpřísňují a výrobci automobilů jsou tím pádem nuceni produkci emisí výrazně snižovat (Pařížská dohoda, normy *Euro* či *Tier*). Zároveň vzhledem k tomu, že finanční prostředky do infrastruktury spalovacích motorů (např. benzínových čerpacích stanic) již byly vynaloženy, se přechod na plnou elektrickou mobilitu, a s tím spojené především vybudování dostatečného množství nabíjecích stanic pro rychlé a bezpečné nabíjení elektrických automobilů a stabilizace elektrické sítě, jeví jako velká finanční zátěž.

Na druhou stranu zájem o elektrické motory a elektromobilitu neustále narůstá, a to zejména díky nulovým emisím během provozu, které přispívají k ochraně životního prostředí a kvůli snižování závislosti na fosilních palivech. Vzhledem k tomu, že se průmysl neustále vyvíjí, se mění i veřejné vnímání a preference. V této diplomové práci budou proto studovány environmentální, technologické i regulační rozdíly spalovacích a elektrických motorů, důraz bude kladen zejména na porovnání emisí obou typů pohonů.

2 Rozbor současného stavu

2.1 Emise

Všechny typy vozidel produkují během svého životního cyklu různé druhy odpadních látek, které mají negativní vliv na životní prostředí a lidské zdraví. Mezi nejzásadnější polutanty patří pevné částice, těkavé organické sloučeniny (VOCs), oxidy dusíku (NO_x), oxid uhelnatý (CO), oxid siřičitý (SO₂), nespálené uhlovodíky (HC) a skleníkové plyny, blíže jsou tyto látky popsány níže. Zatímco benzínové motory emitují více CO₂, dieselové motory se zase vyznačují tím, že produkují více NO_x. Existuje řada sofistikovaných způsobů, jak měřit koncentraci škodlivých látek v ovzduší, bohužel však není možné zjistit přesné procento polutantů, které jsou emitovány přímo automobily, jelikož řada dalších lidských aktivit vede také ke znečištění ovzduší. [1, 2]

Jako pevné částice (PM) se označují kapénky tvořené směsí pevné a kapalné látky o průměru do 10 μm, většinou jsou ale řádově menší. Vzhledem k jejich velikosti mohou tyto částice jednoduše pronikat do lidského organismu (do plic a krevního oběhu) a tím mohou způsobovat vážné zdravotní komplikace. Částice se dělí na jemné (PM_{2,5}) a hrubé (PM₁₀), vznikají opotřebáváním pneumatik, brzd a zejména nedokonalým spalováním uhlíku. Mezi významné producenty pevných částic patří tedy dieselové automobily. [1, 2, 3]

Reakcí těkavých organických sloučenin s oxidy dusíku vzniká za přítomnosti světla ozon, který může mít negativní vliv na respirační systém, konkrétně může snižovat kapacitu plic a vést ke kašlání či dušení. VOCs, které jsou produkovány motorovými vozidly, obsahují současně karcinogeny jako benzen, acetaldehyd a 1,3-butadien. [1, 2, 3]

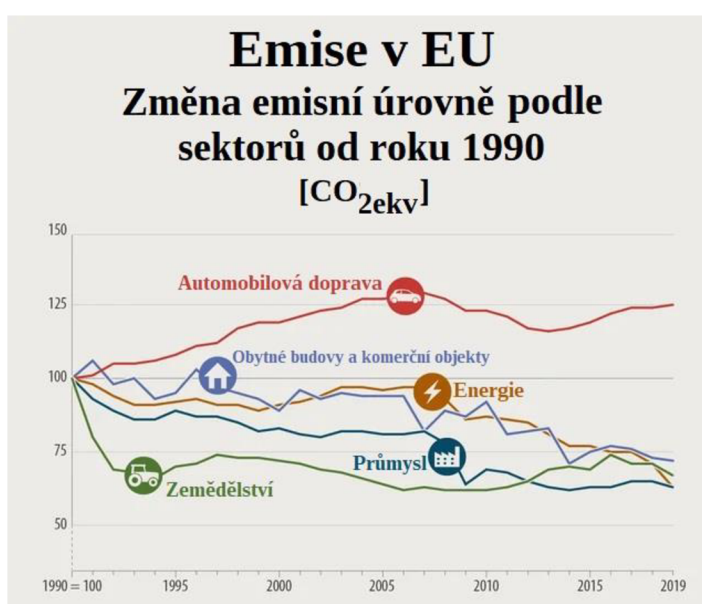
Spalováním benzínu dochází k reakci dusíku s kyslíkem za vzniku oxidů dusíku, které stejně jako ostatní polutanty mohou vést ke zdravotním problémům, konkrétně mohou být příčinou ischemické choroby srdeční, chronických onemocnění plic či rakoviny plic. NO_x jsou zároveň sekundárními producenty ozonu a partikulárních částic. Vozidla s dieselovými motory emitují přibližně 20 % celkové světové produkce NO_x. [1]

Oxid uhelnatý je bezbarvý jedovatý plyn vznikající z fosilních paliv (např. benzínu) a je produkován bezprostředně z vozidel. Inhalace vzduchu se zvýšenou koncentrací CO může v lidském organismu omezovat přenos kyslíku (v mozku, srdci a dalších orgánech). Oxid siřičitý se do ovzduší dostává spalováním paliv obsahujících síru

(především se jedná o diesel a uhlí). SO₂ může na vzduchu reagovat za vzniku pevných částic a představuje velké zdravotní riziko zejména pro děti a astmatiky. [3, 16]

Motorová vozidla emitují také skleníkové plyny (zejména CO₂), které způsobují globální oteplování. V posledních letech se proto zvyšuje snaha přicházet s ekologicky šetrnějšími vozidly, zároveň roste tendence přicházet s alternativními nízkouhlíkovými palivy (např. biopalivy či syntetickými palivy). [4]

Doprava je jediným sektorem, kde se emise CO₂ za posledních 30 let zvýšily (mezi lety 1990 až 2019 vzrostla koncentrace CO₂ o 33,5 %, viz Obr. 1), cílem EU je proto do roku 2050 snížit produkci skleníkových plynů o 90 %. [5]



Obr. 1: Porovnání vývoje emisí v Evropské Unii mezi lety 1990 - 2019 v jednotlivých sektorech [5]

2.1.1 Emise při výrobě aut

Emise vznikající během výrobního cyklu zahrnují vše od těžby surovin až po hotové vozidlo dodané na prodejnu dealera. Důraz na celkové emise během výroby je klíčový pro dosažení udržitelnějšího automobilového průmyslu, a to zejména s rostoucím zájmem o alternativní pohony. Snaha minimalizovat environmentální dopady v každé fázi výroby může přispět k celkové udržitelnosti automobilového sektoru. Při výrobě jednoho automobilu se spalovacím motorem se podle odhadů vyprodukuje 5 – 10 tun CO₂, tato hodnota je ovlivněna typem vozidla, případně energetickým mixem dané lokality. Toto množství představuje až 10 % veškerého CO₂ vyprodukovaného během životního cyklu vozidla (85 % se vyprodukuje během provozu a zbývajících 5 % při likvidaci). V případě elektromobilů se během výroby vyprodukuje přibližně 8 – 20 tun CO₂,

tato hodnota opět závisí na typu vozidla, především pak na jeho baterii a energetickém mixu značící objem vyrobené energie. [45]

2.1.2 Emise výfukových plynů

Emise výfukových plynů vznikají při spalování paliva v motorech. Tyto emise mohou mít negativní dopad na životní prostředí a lidské zdraví. Hlavními složkami emisí výfukových plynů jsou oxidy dusíku, uhlíku, síry, uhlovodíky a pevné částice. [6, 9, 10]

K tomu, aby bylo dosaženo snížení emisí, byla zavedena různá opatření a vzešlo v platnost několik dohod (lokálního i mezinárodního charakteru) jako například Pařížská dohoda, evropské emisní normy *Euro* (popsané v kapitolách níže), případně byly zavedeny emisní pokuty. Nejúčinnějším nástrojem k redukci emisí jsou ovšem technické úpravy automobilů tak, aby se snížila produkce škodlivých plynů či pevných částic. Konkrétně se může jednat například o selektivní katalytický redukční systém u vznětových motorů (popsáno v kapitole 2.2.1.2 *AdBlue*), DPF (filtr pevných částic) nebo o systém recirkulace výfukových plynů EGR (Exhaust Gas Recirculation). EGR systém funguje tak, že při malém zatížení vrací pomocí externího zařízení (EGR ventilu) část spalin odcházejících z motoru zpět do procesu spalování, spaliny tak sníží poměr O_2 ve směsi vzduch-palivo, čímž ochladí spalovací prostor a nedochází k tak vysoké tvorbě NO_x , zároveň se díky tomuto systému také sníží podíl pevných částic ve výfuku. U vznětových motorů se pomocí EGR systému dokáže snížit produkce oxidů dusíku až o 50 %, u zážehových motorů o 40 – 60 %. [6, 9]

Elektromobily se vyznačují nulovými emisemi výfukových plynů, což mnohé výrobce a vlády navádí k propagaci elektromobility jako bezemisního řešení či jako emisně čistou alternativu ke spalovacím motorům. Problém je ovšem ten, že emise jsou v případě elektromobilů produkovány při výrobě, likvidaci ale také nepřímo při provozu, konkrétně vznikají při prvotní těžbě surovin na výrobu baterií a samotných vozů, dále také během výroby energie potřebné na jejich dobíjení. [9, 29, 30]

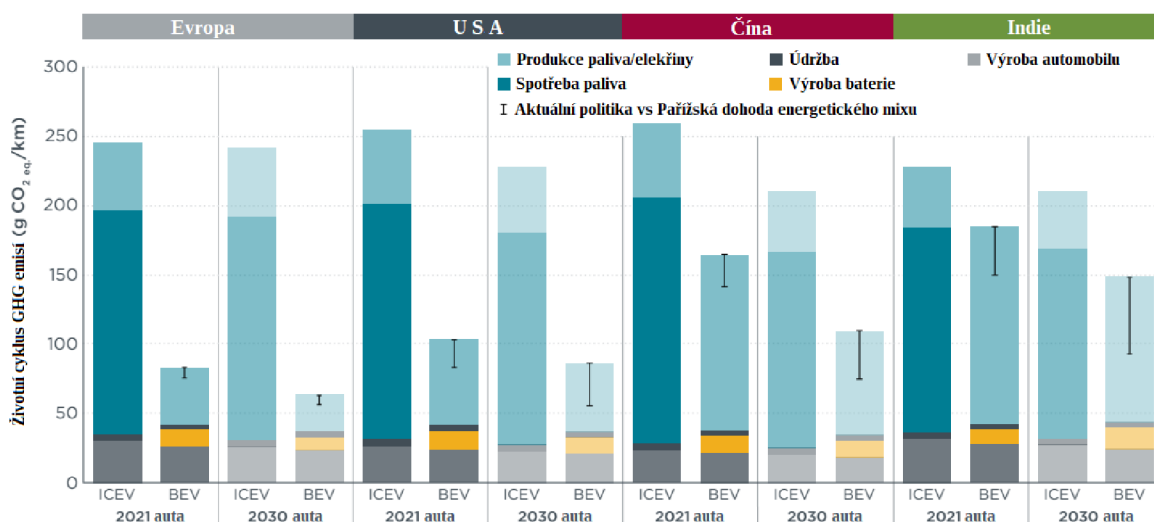
2.1.3 Emisní dohody a nařízení

Kjótský protokol je mezinárodní dohoda, která byla přijata v roce 1997 v japonském městě Kjóto jako součást rámcové úmluvy OSN o změně klimatu (UNFCCC - Rámcová úmluva OSN o změně klimatu). Tato dohoda zavazuje zúčastněné země k omezení emisí

skleníkových plynů, konkrétně oxidu uhličitého, hydrogenovaných fluorovodíků, oxidu dusného, metanu a fluoridu dusitého a sírového. Protokol současně popisuje mechanismy obchodování s emisními povolenkami a společné plnění projektů, které mají za cíl emise redukovat. Kjótský protokol byl v roce 2016 nahrazen Pařížskou dohodou. [7]

2.1.3.1 Pařížská dohoda

Pařížská dohoda je závazná mezinárodní smlouva o změně klimatu, která vešla v platnost v listopadu roku 2016. Cílem dohody je do budoucna udržet nárůst globální teploty pod 2 °C v porovnání s teplotami před průmyslovou revolucí. Aby se zamezilo globálnímu oteplování pod tuto úroveň, musí do roku 2030 emise skleníkových plynů klesnout o 43 %. Konkrétní typy emisí (a tudíž ani emise produkované automobily) nejsou v dohodě blíže specifikovány, dohoda nicméně stanovuje obecné zásady a cíle pro jejich snížení. Jedním z hlavních cílů, který souvisí s automobilovým průmyslem, je podpora přechodu na ekologičtější a nízkoemisní vozidla. [8, 9]



Obr. 2: Emise skleníkových plynů během životního cyklu vozidel [9]

Na obrázku (Obr. 2) jsou znázorněny emise skleníkových plynů během životního cyklu průměrného motorového vozidla se spalovacím motorem (ICEV) a elektromobilu s baterií (BEV), současně jsou zobrazeny rozdíly emisí v Evropě, Spojených státech, Číně a Indii v roce 2021 a predikovaný stav emisí k roku 2030. Chybové sloupce u BEV zobrazují rozdíl mezi vývojem podle současných standardů (vyšší hodnoty) a potenciálním vývojem podle Pařížské dohody. [9]

2.1.3.2 Evropská unie

V rámci Evropské unie bylo přijato několik nařízení a směrnic, které se zaměřují na snižování emisí z nákladních a osobních automobilů, například normy *Euro*, týkající se emisí znečišťujících látek jako jsou oxidy dusíku a částicový materiál, případně normy stanovují limity pro emise vozidel prodávaných na evropském trhu. Normy byly zavedeny jako opatření ke snížení dopadu automobilů na životní prostředí a lidské zdraví. Každá norma *Euro* stanovuje limity emisí pro různé typy vozidel (osobní automobily, nákladní automobily, autobusy apod.) a určuje, jaká technologická opatření musí výrobci vozidel přijmout, aby byly tyto limity splněny. Každá nová verze *Euro* normy zavádí přísnější limity emisí než předchozí verze. V současné době je platná norma *Euro 6*, v polovině roku 2025 by měla vejít v platnost norma *Euro 7*. V rámci *Euro 7* by se nově měly měřit emise z brzd a pneumatik, emisní limity by měly být velmi podobné jako v *Euro 6*. Přehled hodnot emisních norem pro spalovací motory *Euro* je uveden v tabulce níže (Tab. 1). Levé sloupce s tučně vyznačenými čísly zobrazují maximální hodnoty pro benzínové motory, sloupce napravo uvádí limity pro naftové motory. Výrobci automobilů jsou povinni tyto limity splňovat, zároveň musí zajistit, aby jejich vozidla byla certifikována podle příslušné *Euro* normy, v opačném případě by vozidla nemohla být prodávána na evropském trhu. [9, 10]

Tab. 1: Přehled emisních norem Euro a konkrétních emisních limitů pro osobní automobily [10]

| Rok | Norma | CO [g/km] | | NO _x [g/km] | | HC + NO _x [g/km] | | HC [g/km] | PM [g/km] |
|------|-------|--------------|------|---------------------------|------|--------------------------------|------|--------------|--------------|
| 1992 | I | 3,16 | 3,16 | – | – | 1,13 | 1,13 | – | 0,18 |
| 1996 | II | 2,20 | 1,00 | – | – | 0,50 | 0,70 | – | 0,08 |
| 2000 | III | 2,30 | 0,64 | 0,15 | 0,50 | – | 0,56 | 0,20 | 0,05 |
| 2005 | IV | 1,00 | 0,50 | 0,08 | 0,25 | – | 0,30 | 0,10 | 0,025 |
| 2009 | V | 1,00 | 0,50 | 0,06 | 0,18 | – | 0,23 | 0,10 | 0,005 |
| 2014 | VI | 1,00 | 0,50 | 0,06 | 0,08 | – | 0,17 | 0,10 | 0,005 |
| 2025 | VII | * | * | * | * | * | * | * | * |

*Hodnoty evropské emisní normy *Euro 7*, které zatím nejsou finálně definovány.

Emisní pokuty vozidel

Emisní pokuty jsou ukládány Evropskou unií automobilovým výrobcům za překročení stanovených emisních limitů. Limit (max. 95 g CO₂ na 1 km pro osobní automobily) byl nastaven Evropskou unií v roce 2019 nařízením 2019/631 jako součást ekologické reformy. Pokud průměrné hodnoty emise CO₂ výrobce v daném roce překročí, musí zaplatit pokutu ve výši 95 EUR za každý gram navíc, a to u každého registrovaného vozu daného modelu. [11]

Velká část automobilek proto na trh uvádí ve velkém počtu elektromobily, hybridy či jiná alternativní vozidla, aby snížily hodnoty požadovaného emisního limitu EU. Jiní výrobci se naopak soustřeďují na výrobu elektromobilů a aut s alternativním pohonem proto, že emisní pokuty vnímají jako byznys a nabízejí své „přebytečné“ povolenky k nákupu výrobcům, kteří by emisní limity překročili. Ve výsledku se tedy vyprodukované emise v daném regionu nijak nesníží. [11]

2.1.3.3 USA

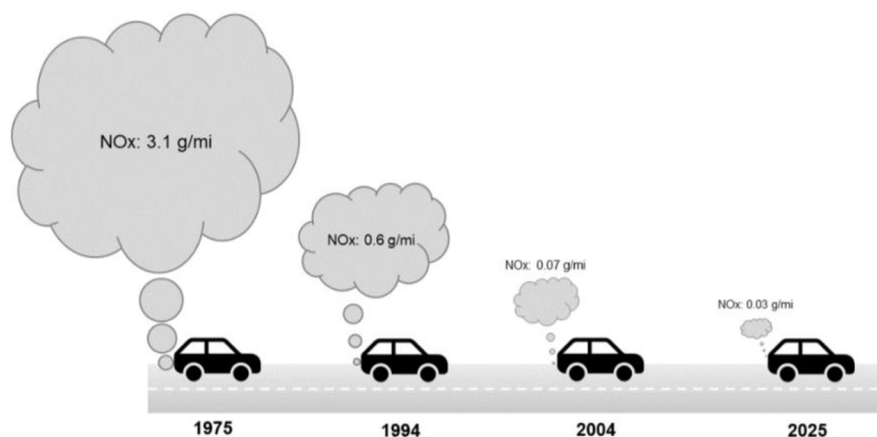
Za emisní normy v USA je zodpovědná EPA (Environmental Protection Agency tj. Agentura pro ochranu životního prostředí), případně NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration tj. Národní úřad pro bezpečnost silničního provozu). EPA stanovuje emisní normy (tzn. normy *Tier*) nejen pro osobní vozidla, ale také pro různé typy strojů, včetně zemědělské a stavební techniky, lodí a vlaků. Pro osobní automobily jsou v současné době platné normy *Tier 4*, které jsou uplatňovány od roku 2015. Limity normy *Tier 4* jsou uvedeny v Tab. 2. Hodnoty emisí jsou kategorizovány do jednotlivých skupin podle výkonu motoru aut. [12, 14]

Tab. 2: Přehled emisních norem *Tier 4* [14]

| Výkon motoru | CO [g/kWh] | PM [g/kWh] | NMHC + NO _x [g/kWh] | NO _x [g/kWh] |
|---------------|---------------|---------------|-----------------------------------|----------------------------|
| kW < 8 | 8 | 0,4 | 7,5 | - |
| 8 ≤ kW < 19 | 6,6 | 0,4 | 7,5 | - |
| 19 ≤ kW < 37 | 5,5 | 0,03 | 4,7 | - |
| 37 ≤ kW < 56 | 5 | 0,03 | 4,7 | - |
| 56 ≤ kW < 130 | 5 | 0,02 | - | 0,4 |

| Výkon motoru | CO [g/kWh] | PM [g/kWh] | NMHC + NOx [g/kWh] | NOx [g/kWh] |
|----------------|---------------|---------------|-----------------------|----------------|
| 130 ≤ kW ≤ 560 | 3,5 | 0,02 | - | 0,4 |

Kromě zavádění standardů emisí, které musí vozidla splňovat při provozu na silnicích, provádí EPA i samotné kontroly a inspekce vozidel, aby zajistila, že automobily splňují emisní normy i v reálném provozu. EPA je také oprávněna regulovat kvalitu paliv a palivových aditiv používaných pro automobilové zdroje. Z Obr. 3 je patrné, jak rapidně se ve Spojených státech amerických snížily emise dusíkatých oxidů od roku 1975. V roce 2025 by měla vozidla produkovat maximálně 0,03 gramu na jednu ujetou míli (g/mi), což je o 98 % méně než v roce 1975. [12, 13, 14]



Obr. 3: Znárodnění úspěšného snížení emisí dusíkatých oxidů v USA od roku 1975 [13]

2.1.3.4 Čína

Čínská vláda přikládá velký význam omezování emisí v automobilovém průmyslu a aktivně se snaží snižovat negativní vlivy na životní prostředí. S přibližně 400 miliony registrovanými auty je v současnosti čínský trh s automobily větší než trhy v USA nebo v Evropě. Čínská vláda stanovuje národní normy pro emise znečišťujících látek z nových vozidel, včetně oxidu uhličitého, oxidů dusíku a částicového materiálu. Tyto normy se postupně zpřísňují, aby podpořily přechod na ekologičtější a nízkoemisní vozidla. V některých čínských městech byly i zřízeny zvláštní zóny s nízkými emisemi, ve kterých jsou stanoveny přísnější emisní limity pro vozidla. Čína je taktéž signatářem Pařížské dohody. [9, 15]

2.2 Rozdíly mezi spalovacími motory a elektromotory

V automobilovém průmyslu jsou používány dva typy motorů - spalovací motor a elektrický motor. Mezi spalovací motory se podle způsobu zapalování směsi paliva řadí motory zážehové a vznětové. Elektrické motory jsou poháněny elektřinou a v poslední době se stávají stále populárnější volbou v automobilovém průmyslu.

Spalovací motory se používají k pohonu dopravních prostředků, pracovních strojů, zemědělských strojů aj. Narůstající zájem o elektromotory však vede k tomu, že i například ve stavebním průmyslu se poslední roky intenzivně řeší nahrazování spalovacího motoru elektromotorem (viz kapitola 3.4). Detailnější charakteristika motorů je popsána v následujících kapitolách (2.2.1 a 2.2.2). [16, 17, 18]

2.2.1 Spalovací motor

Spalovací motor funguje na principu spalování směsi paliva a vzduchu v uzavřeném prostoru, což vytváří energii, která je následně přeměněna na pohyb, tzn. dochází k přeměně chemické energie na energii mechanickou. Pro ohřev plynů, které jsou uzavřeny v prostoru válce je nejprve potřeba zahájit proces hoření. V současné době existují dva způsoby, kterými je možné plyny zažehnout. Vlivem nastavených podmínek může buď dojít k samovznícení paliva (tzv. vznětový motor) nebo je plyn zažehnut pomocí vnějšího impulsu (tzv. zážehový motor). Vznětové a zážehové motory jsou podrobněji popsány v kapitolách 2.2.1.2 a 2.2.1.3. [17, 19]

Existuje mnoho druhů paliv, které mohou být použity ve spalovacích motorech, jako např.:

- **Nafta** - Nafta je palivová látka, která se získává při rafinaci ropy a vyznačuje se specifickými vlastnostmi. Hlavní rozdíl mezi benzínem a naftou spočívá ve složení a způsobu hoření. Nafta obsahuje těžší uhlovodíky než benzín a má vyšší energetickou hustotu. Za účelem zlepšení vlastností, zamezení pění, snížení koroze, nebo omezení vodivosti se do nafty často přidává řada aditiv, například detergenty se využívají pro lepší čištění motoru od úsad. Aditiva v naftě mohou taktéž snižovat vibrace a hluk motoru, případně se mohou přidávat kvůli zvýšení cetanového čísla. Vyšší cetanové číslo zlepšuje spalování paliva, resp. zvýší a stabilizuje výkon, s kvalitnějším spalováním současně souvisí také snížení spotřeby

paliva a nižší produkce emisí. Hodnoty cetanového čísla se standardně pohybují v rozmezí 51 až 65. [19, 21]

- **Benzín** - Benzín je kapalina, která je získávána z ropy při rafinaci. Hlavní složkou benzínu jsou uhlovodíky, konkrétně uhlovodíky alifatické a aromatické. Většina moderních benzínových aut používá palivo s oktanovým číslem 95, které obsahuje 95 % oktanu a 5 % heptanu (v Česku známé pod označením Natural 95), používá se však také benzín oktanovým číslem 98 (Natural 98), nebo dokonce i benzíny s oktanovým číslem 100. Sto-oktan se používá nejčastěji na zazimování motocyklů či zahradní techniky, jelikož neobsahuje líh a má v sobě menší či dokonce nulový podíl biosložky. Paliva s vyšším oktanovým číslem lépe odolávají samovznícení, což vede ke zvýšení výkonu, menšímu termodynamickému klepání a nižšímu namáhání motoru. [19, 21, 22]
- **LPG** - LPG (Liquefied Petroleum Gas, resp. zkapalněný ropný plyn) je směs převážně propanu a butanu vznikající při rafinaci ropy. LPG automobily (oficiálně prodávané vozy i předělaná auta se zážehovými motory) fungují pomocí přepínatelného provozu – auto nastartuje na benzín a po zahřátí přepne a začne využívat jako palivo plyn. Hlavní výhodou LPG z hlediska ekologie je nižší podíl produkovaných emisí, a to zejména jedovatého oxidu uhelnatého, nespálených uhlovodíků, případně pevných částic. Naopak jednou z hlavních nevýhod vozidel poháněných LPG je, že nemohou parkovat v podzemních garážích kvůli možnému výbuchu při případném úniku plynu. Vzhledem k tomu, že propan-butanová směs je těžší než vzduch a hromadí se u země, by odvětrávání bylo v podobných prostorách velmi náročné. Další nevýhodou takto poháněných vozidel je též nižší výkon motoru přibližně o 10 %. [16, 23, 24]
- **CNG** - CNG (Compressed Natural Gas, resp. stlačený zemní plyn) je stlačený biometan, jehož hlavní složkou je metan. Oproti jiným pohonným hmotám, případně LPG, je šetrnější vůči přírodě a zároveň je bezpečnější. Například oproti benzínu a naftě produkují vozidla poháněná CNG asi o 20 % méně CO₂, spalováním CNG současně nevznikají pevné částice. Bezpečnost stlačeného biometanu je dána jeho teplotou vznícení a hustotou. Teplota vzplanutí CNG je přibližně 595 °C, což je zhruba o 200 °C více, než má zkapalněný plyn (LPG). Zemní plyn je zároveň lehčí

než vzduch, na rozdíl od LPG je tudíž možné ho při náhodném úniku jednoduše odvětrat. Automobily na CNG jsou navíc při provozu tišší. [25]

- **HCNG** - HCNG (Hydrogen compressed natural gas) je směs zemního plynu a vodíku (obsahuje 8 – 20 % vodíku, zbytek tvoří stlačený zemní plyn), která kombinuje výhody obou paliv. Přidáním vodíku do zemního plynu se snižují emise nespálených uhlovodíků a oxidů dusíku, zlepšuje se účinnost motoru a snižuje se tím spotřeba paliva. Automobily s palivem HCNG vyprodukují méně emisí než s CNG (přibližně o 70 %). Také spotřeba paliva je u HCNG automobilu při stejných podmínkách nižší než u automobilu, který je poháněn pouze stlačeným zemním plynem. [26]
- **Vodík** - Při spalování vodíku by teoreticky neměly vznikat problematické produkty jako oxid uhelnatý a oxid uhličitý, ale pouze voda, viz (1).



Bohužel v praxi ve spalovacích motorech při spalování směsi s vodíkem téměř vždy vznikají sloučeniny dusíku. Dopad na životní prostředí a energetická účinnost vodíku závisí na způsobu jeho výroby (je možné ho vyrábět například z ropy nebo elektrolýzou). Vzhledem k nízké energii potřebné pro vznícení vodíku může docházet k tomu, že se směs při kontaktu s horkým místem ve válci okamžitě vznítí, čímž nedochází k zapálení v ideálním požadovaném okamžiku, a což současně vede k neefektivnímu chodu motoru. [23]

- **Etanol** - Etanol je biopalivo, které se obecně vyrábí z obnovitelných zdrojů jako je biomasa a zemědělské suroviny. Díky vysokému oktanovému číslu je možné etanol použít jako palivo v zážehovém motoru s vyšším kompresním poměrem. Další výhodou je, že hoří lépe než benzín či nafta a produkuje méně CO a CO₂. Bohužel kvůli obtížnému vznícení při nízkých teplotách je nutné ho směřovat s benzínem (obvykle se používá v poměru 85:15, etanol:benzín), 100% etanol není jako palivo používán. [19, 23]
- **Biodiesel** - Biodiesel, resp. bionafta, je další druh biopaliva. Je vyráběn reesterifikací z olejnatých plodin, jedná se tedy o netoxické ekologické palivo s nízkým obsahem emisí. V dnešní době se bionafta používá jako příměs do standardní motorové nafty. 100% čistý biodiesel je možné používat jen v některých upravených spalovacích motorech, vyznačuje se sice nižšími emisemi a je méně toxický, při nízkých

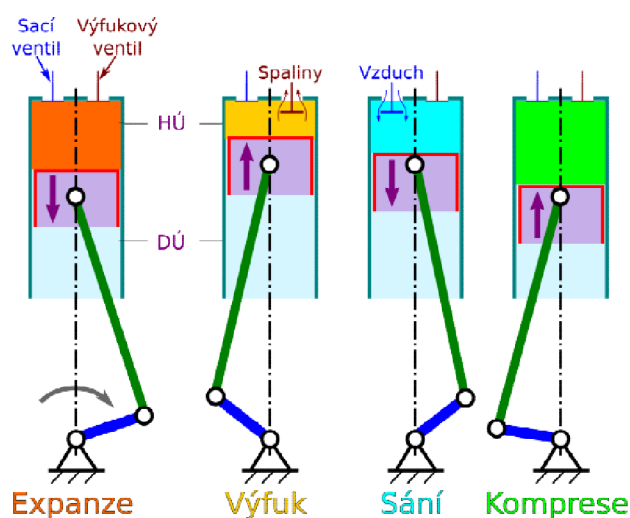
teplotách je však vysoce viskózní a má tendenci rozpouštět usazeniny, což může způsobovat ucpávání palivového potrubí a filtrů. [27]

Výše zmíněná paliva jsou používána nejčastěji, existuje ale i řada dalších paliv, která mohou být použita ve spalovacích motorech jako například acetylen nebo metanol. Každý druh paliva má své výhody i nevýhody, zároveň je často specifický pro různé druhy použití. [19, 23]

2.2.1.1 Princip fungování spalovacího motoru

Princip funkce čtyřtakovního zážehového spalovacího motoru (viz Obr. 4) je dělen do 4 fází:

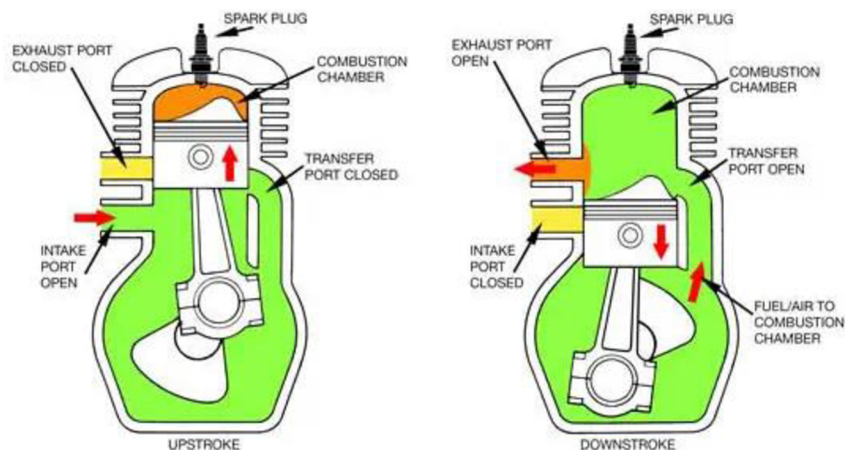
1. Sání: Při sání je otevřen vstupní sací ventil, přičemž píst se pohybuje směrem do DÚ (dolní úvrať). Během této fáze dochází k nasátí směsi paliva a vzduchu ve stanoveném poměru. [18, 19]
2. Komprese: Při stlačení je sací i výfukový ventil uzavřený, píst se pohybuje do HÚ (horní úvrať), čímž vzroste tlak a teplota směsi, zároveň soustava zmenší svůj objem. [19]
3. Expanze: Pomocí elektrické svíčky (a díky přítomnému vzduchu) dochází k zažehnutí paliva, poté následuje jeho shoření. Tím se prudce zvýší tlak a píst je nucen se pohybovat směrem k DÚ. [19]
4. Výfuk: Píst se pohybuje směrem k HÚ. Během této fáze je otevřen výfukový ventil, pohybem pístu jsou tudíž spaliny vytlačovány ven z válců. [18, 19]



Obr. 4: Schéma pracovního cyklu čtyřdobého zážehového motoru [19]

Tyto čtyři fáze (sání, komprese, expanze a výfuk) se během chodu zážehového spalovacího motoru neustále opakují. Princip vznětového (dieselového) motoru je podobný, při sací fázi je z okolí do válce nasáván vzduch. Sací ventil se uzavře a píst se pohybuje nahoru do HÚ, čímž dochází ke stlačování vzduchu. Ve chvíli, kdy je píst téměř v HÚ, je vstřikováno palivo. Vstřikované palivo se posléze vznítí samovolně vlivem vysoké teploty vzduchu. [18, 19]

Další variantou je motor dvoudobý (tzv. dvoutaktní, viz Obr. 5), tyto motory jsou využívány například u skútrů, motocyklů a lodí. Cyklus začíná pohybem pístu z DÚ vzhůru a nasátím a stlačením směsi vzduchu a paliva. Když se píst dostane do HÚ, jiskra zapálí stlačenou směs. Stlačená plynná směs po zapálení expanduje a píst se pohybuje do DÚ, čímž se odkryje výfukový kanál, kterým plyny odcházejí a do válce vstupuje čerstvá palivová směs, a takto se cyklus neustále opakuje. [19, 28]



Obr. 5: Schéma pracovního cyklu dvoudobého motoru [28]

Výhodou dvoutaktního motoru v porovnání se čtyřdobým motorem je jednodušší konstrukce a vyšší počet pracovních cyklů na stejný počet otáček. Nevýhodou dvoudobého motoru je možná přítomnost zbytkových plynů ve válci, zároveň je zde také riziko, že se část směsi může dostat přímo do výfukového otvoru, aniž by byla spálena a využita, s čímž souvisí vysoká spotřeba paliva a spalování oleje obsaženého v palivu. U dvoudobých motorů dochází současně k většímu opotřebení pohyblivých částí. [19, 28]

2.2.1.2 Vznětový motor

Jak již bylo uvedeno výše, pístový vznětový motor funguje na principu spalování směsi motorové nafty a vzduchu v uzavřeném prostoru, což vytváří energii, která je následně přeměněna na pohyb. V prostorách vznětového motoru je v oblasti HO výrazně vyšší tlak (a tedy i teplota) než u motoru zážehového, tudíž dochází k samovolnému vznícení. Celková účinnost vznětového motoru bývá maximálně 40 – 50 %. Na množství emisí má vliv aditivum AdBlue, studený start, celkový stav automobilu (a motoru), případně jízdní podmínky. [19, 28]

AdBlue

Roztok močoviny a demineralizované vody známý pod obchodním názvem AdBlue se používá v diesellových motorech k řízení emisí oxidu dusíku. V dnešní době většina diesellových motorových vozidel toto aditivum, z důvodu zvyšujících se požadavků na snížení emisí a snižování spotřeby paliva, využívá. Při optimálním nastavení vede k nižší spotřebě paliva (asi o 5 %) a snížení produkce CO₂. AdBlue je automaticky vstříkováno do výfukové soustavy vozidla (resp. před katalyzátor, kde dochází k chemické reakci), čímž nikdy nepřichází do styku s palivem. Čpavek, který se uvolňuje, rozkládá pak oxidy dusíku na samotný dusík (N₂) a vodní páru (H₂O), čímž se množství emitovaných NO_x snižuje. [43]

Studený start motoru

Studený start motoru, ať už se jedná o motor vznětový nebo zážehový, představuje běžný, ale často opomíjený aspekt chodu vozidla. Jedná se o jakékoliv nastartování, při kterém není motor zahřátý na provozní teplotu a kvůli tomu nedochází k dostatečnému mazání, ale k (polo)suchému tření, což představuje problém pro motor. Během krátkého časového úseku (několik desítek vteřin, spíše jednotky minut) je z důvodu vysokých teplot katalyzátoru uvolňováno velké množství výfukových emisí, především pak CO a HC. Při nedokonalé oxidaci dochází k uvolňování oxidu uhelnatého s koncentracemi do desetiny procenta. Při zahřátém motoru na provozní teploty jsou obecně koncentrace CO nižší než u spalovacího motoru. Vysoká je i spotřeba paliva. Zvláště u vznětových motorů může být proces studeného startu problematický, a to z několika důvodů. [19]

Ve vznětovém motoru se stlačuje vzduch, čímž může být při nízkých teplotách obtížnější dosáhnout potřebné teploty pro spolehlivý provoz. Dalším problémem je olejová viskozita. Při nízkých teplotách se motorový olej stává hustším, což může omezit jeho pohyb a snižuje se tím účinnost mazání, čímž se ve výsledku zvyšuje opotřebení motorových součástí (správné mazací vlastnosti má olej přibližně při 80 °C). V neposlední řadě vyžaduje vozidlo při studeném startu vyšší elektrický proud na zahřátí svíček, což může (zejména při nízkých teplotách, kdy je kapacita baterie přirozeně snížena okolní teplotou) představovat problém pro samotnou baterii. [19, 20]

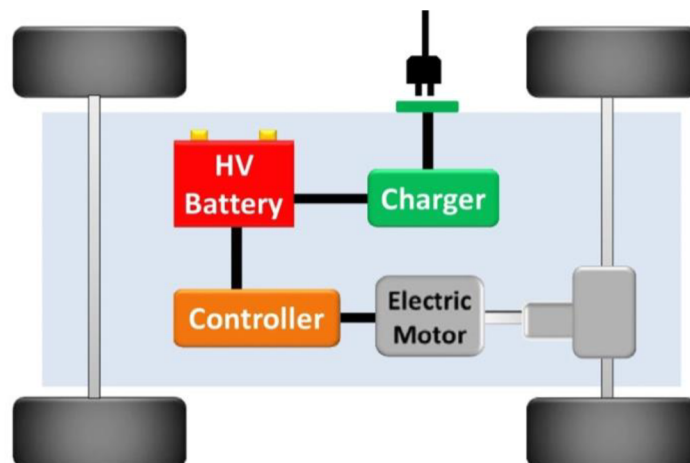
2.2.1.3 Zážehový motor

Zážehový motor, také často nazýván benzínový motor, je typem spalovacího motoru, který je vyvíjen od konce 18. století, ale velký posun nastal až v roce 1859, kdy získal Étienne Lenoir patent na motor poháněný svítíplynem. O několik let později, v roce 1879, Karl Benz zkonstruoval dvoudobý spalovací motor, jenž je velmi podobný dnešnímu zážehovému motoru. [17]

Motor využívá vnitřního spalování pro pohon vozidel, letadel a mnoha dalších strojů, zážeh směsi zajišťuje elektrická jiskra. Zážehové motory produkují emise oxidu uhličitého, oxidů dusíku a nespálených uhlovodíků, oproti vznětovému motoru produkují více CO₂, ale naopak méně oxidů dusíku. Ještě donedávna byly zážehové motory jednodušší na údržbu, při současných snahách o snížení emisí na minimální hodnoty se však tento rozdíl pomalu vyrovnává. Jak již bylo zmíněno výše, spotřeba pohonné směsi je v případě zážehových motorů mnohem vyšší než u automobilů se vznětovým motorem, a to především na delší vzdálenosti. [17, 18]

2.2.2 Elektromotor

Elektromobil lze zjednodušeně rozdělit na tři hlavní části, tj. akumulátor, elektromotor a regulátor (viz Obr. 6). Elektromobil je v porovnání s automobilem se spalovacím motorem jednodušší, jelikož neobsahuje startovací, výfukový ani mazací systém, někdy není součástí dokonce ani chladič systém. [29, 30]



Obr. 6: Zjednodušené schéma elektromobilu [30]

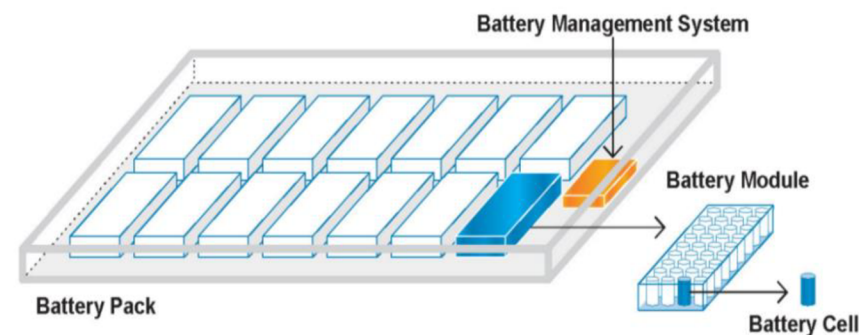
Elektrický motor přeměňuje elektrickou energii na mechanickou práci. Je složen ze dvou hlavních částí, tj. statoru a rotoru. Stator vytváří elektromagnetické pole pomocí stejnosměrného proudu a rotor se pohybuje, čímž generuje proměnlivé magnetické pole. Rotor se státorem střídavě přitahuje a odpuzuje, čímž se rotor otáčí a pohání vozidlo. Neexistuje jednotná konstrukce elektromotoru, každý elektromotor má své výhody i nevýhody (rozdílná účinnost, hmotnost či cena). Nejběžnější jsou třífázové synchronní motory, které jsou umístěny na zadní nápravě, motor lze však umístit i na přední nápravu. Vzhledem k tomu, že v zadní části vozidla se kroutící moment elektromotoru dokáže efektivně a snadněji přenést na vozovku pomocí zadních kol se jako vhodnější jeví umístění elektromotoru na zadní nápravě. [29, 30]

Většina vyráběných elektromotorů je tvořena převážně slitinami NdFeB či SmCo (neodym-železo-bór či samarium-kobalt). Tyto slitiny obsahují vzácné prvky Nd (Neodym) a Sm (Samarium), které se používají na výrobu silných magnetů. Největší ložiska těchto rud se nacházejí především v Číně, dále také v USA či Vietnamu. Vzhledem k problémům, ke kterým dochází během kontrol vývozu z Číny, vznikají již delší dobu také indukční elektromotory, které tyto slitiny neobsahují. [30]

Akumulátor

Zdrojem elektrické energie pro motor elektromobilu je akumulátor, který se nabíjí buď zapojením do elektrické sítě přes nabíječku nebo pomocí rekuperace při brzdění. Účinnost nabíjecích zařízení se v dnešní době pohybuje mezi 80 až 95 %, až 20 % energie sítě je tedy ztrátové (jedná se o energii, která je přeměněna na teplo). Baterie je uložena

na podvozku automobilu a skládá se z několika stovek spojených bateriových článků uložených v modulech, tyto moduly pak tvoří bloky každé baterie v autě (viz Obr. 7). Většina dnešních plně elektrických vozidel používá lithium-iontové (Li-ion) baterie, které se oproti jiným typům baterií (např. NiMH - Niklmetal hydridová baterie) vyznačují velkou spolehlivostí a dlouhou životností. Hlavními parametry akumulátoru, které určují emisní zatížení, jsou kapacita, doba nabíjení, životnost baterií a jejich recyklace. [29, 30, 31, 32]



Obr. 7: Lithium-iontový akumulátor [32]

Kapacita baterií

Kapacita baterie elektromobilu hraje velkou roli v celkové výdrži, respektive je parametrem, který ovlivňuje dojezdovou vzdálenost vozidla. Kapacita jednotlivých akumulátorů aut se liší v závislosti na konkrétním složení baterie, zároveň se postupem času, vlivem chemického stárnutí, snižuje. Kapacita osobního automobilu se pohybuje v rozmezí hodnot 40 – 80 kWh, například elektromobil Nissan LEAF s LiMnO_2 baterií má kapacitu 24 kWh, oproti tomu model Tesla S s baterií LiNiCoAlO_2 70 kWh. Kapacitu lze vyjádřit v kWh resp. ve Wh - přepočít je zobrazen v rovnici (2), kde Wh zobrazuje Watt hodiny, Ah Amper hodiny a V Volty.

$$Wh = Ah \cdot V \quad (2)$$

Vyšší kapacita akumulátoru u elektromobilu může pozitivně ovlivnit jeho životnost, neplatí zde ovšem přímá úměra, vyšší kapacita automaticky neznamená i delší životnost. Baterie elektromobilu s větší kapacitou mají však obvykle menší DoD (Depth of Discharge - hloubka vybití), právě proto, že je není potřeba tak často a extrémně vybíjet. Elektromobily s vyšší kapacitou zároveň často disponují sofistikovanějšími systémy správy baterií, které mohou optimalizovat nabíjení a vybití, část výrobců dokonce zavádí opatření v podobě „uzamčení“ části kapacity baterie, aby předešli jejímu úplnému vybití. Tato opatření mohou vést ke snížení opotřebení a prodloužení životnosti baterie. [30, 32]

Životnost baterií

Životnost baterií je z pohledu emisního zatížení nejdůležitějším parametrem. Standardně se udává v počtu cyklů nabíjení a vybíjení, při kterých si baterie dokáže udržet konstantní vlastnosti, jeden cyklus představuje jedno úplné vybití a následné úplné nabití. V současné době jsou nabízeny elektromobily s životností okolo 8 až 10 let, což obvykle znamená 1 000 až 1 500 nabíjecích cyklů, přibližně tedy 150 000 až 180 000 ujetých km. Vzhledem k tomu, že počet cyklů závisí na mnoha faktorech, a tudíž ho není možné jednoduše určit, je výrobce schopen garantovat pouze minimální počet nabíjecích cyklů. [30, 31, 32]

Mezi faktory ovlivňující životnost baterií patří konkrétní chemické složení, kapacita, hloubka vybíjení, teplota a také způsob nabíjení. Vysoké teploty mohou vést k rychlejší degradaci baterie, nastavení teplotního rozsahu baterie je proto klíčovým parametrem pro udržení jejího výkonu a životnosti. Lithium-iontové baterie mají standardně rozsah pracovních teplot v rozmezí 0 °C až 50 °C, limitní teplotu nejčastěji -30 °C a bývají neúčinnější mezi teplotami 20 °C až 25 °C. Když je baterie vystavena vysokým teplotám, klesá také její kapacita, extrémní teploty mohou současně trvale poškodit vnitřní strukturu baterie. [30, 31, 32, 33]

Recyklace

Recyklace je v mnoha ohledech komplikovaná, ale ekologicky šetrná alternativa k likvidaci odpadu. Recyklací lze ušetřit až 50 % nákladů na výrobu nové baterie (hodnota 1 tuny surovin v bateriích je přibližně 7 708 amerických dolarů, hodnota materiálu na jedno auto je tedy přibližně jeden až dva tisíce eur), zároveň se tím při výrobě snižuje uhlíková stopa až o 40 %. Metody recyklace byly a stále jsou předmětem výzkumu s cílem maximalizovat získávání cenných kovů a dalších surovin nazpět. V současnosti existují dva využívané recyklační procesy: pyrometalurgie a hydrometalurgie. Příprava baterie je u obou procesů stejná. Zjednodušeně u obou metalurgických metod dochází nejprve k demontáži, následně k drcení a po vytvoření kovového prášku nakonec k tavně. Základní charakteristiky recyklačních procesů jsou vypsány níže. [30, 42]

Pyrometalurgie:

- potřeba vysokých teplot k extrakci,
- škodlivé plynné frakce jako vedlejší produkty,
- nízká selektivita materiálů (lze získat pouze nikl, kobalt a měď, zbytek je obsažen ve strusce a končí jako odpad, případně je prodán stavebním společností, které jej mohou využít jako betonovou přísadu),
- levná a efektivní metoda, časově nenáročná.

[42]

Hydrometalurgie:

- potřeba nízkých teplot k extrakci,
- kvůli riziku požáru se provádí pod ochrannou atmosférou,
- nevzniká CO₂ ani jiné toxické plynné frakce jakožto vedlejší produkty,
- vysoká selektivita materiálů,
- drahé, časově náročné.

[42]

I přes vysoké energetické nároky, nepříznivé environmentální dopady a nízkou selektivitu recyklovaných kovů převažuje v současné době pyrometalurgický způsob recyklace, případně se využívá kombinace obou metod. Vzhledem k výhodám hydrometalurgického procesu bude snaha využívat tento způsob recyklace pravděpodobně narůstat, v současné době je však tato metoda stále spíše ve fázi vývoje. [42]

2.3 Dopad na životní prostředí

Elektrické automobily (případně hybridy) se obecně považují za vozidla šetrnější vůči životnímu prostředí. V případě elektroaut jsou emise (CO₂ a dalších škodlivých látek) produkované automobilem během jízdy nulové, v případě hybridů jsou alespoň výrazně redukovány. Elektromobily opravdu mohou představovat ekologicky šetrnější variantu vozidel – záleží ovšem na tom, jakým způsobem jsou vyráběny a dobíjeny. [51]

Jedním z hlavních faktorů, který ovlivňuje dopad elektrovozidel na životní prostředí je způsob, jakým vzniká energie, kterou je vozidlo dobíjeno. Pokud je například vozidlo nabíjeno celou noc za využití elektrické energie, která je vyráběna uhelnou elektrárnou (které pro výrobu elektrické energie využívají spalování uhlí), dochází ke spalování velkého množství uhlí a tím pádem bude mít i elektromobil spíše negativní vliv na životní prostředí. Řada zemí se pro výrobu elektrické energie proto snaží využívat jiné způsoby (kombinace zemního plynu, větrné a solární energie atd.), aby se redukovalo množství spáleného uhlí. [51]

Další problém mohou představovat materiály, ze kterých se vyrábějí baterie. K výrobě Li baterií, které jsou součástí většiny elektro vozidel, jsou využívány nebezpečné materiály jako Co, Li či prvky vzácných zemin. Například těžbou kobaltu vznikají nebezpečné hlušiny a strusky, které se velmi snadno dostávají do okolí a při dlouhodobé expozici mohou mít negativní dopad na lidské zdraví. [51]

Dalším problémem je recyklace baterií, během které jsou produkovány různé druhy (i toxických) látek, zároveň se spotřebovává velké množství vody. Proces recyklace je současně nebezpečný pro zaměstnance, kteří se na recyklaci podílí – v případě rtuti (Hg) může přes kůži docházet k její absorpci, případně může docházet k inhalaci či požití dalších toxických látek. I přesto, že baterie obsahují řadu cenných kovů a dalších materiálů, je procento zrecyklovaných baterií stále poměrně nízké. [51, 52]

Recyklací 1 kg baterie vzniká:

1. 0,24 kg strusky a 0,03 kg toxických látek (v pevném stavu)
2. < 0,1 kg Sb, Hg, Ni, Pb, Cd (v kapalném stavu)
3. < 5 g Pb, Cd, Cu, Zu, As, Ni (v plynném stavu)

2.4 Automobily a další stroje poháněné elektromotorem místo spalovacího motoru

Tradiční spalovací motory nahrazují v posledních letech nové technologie, což ovlivňuje nejen běžnou silniční dopravu, ale i dopravu ve stavebnictví a zemědělství. Elektrické pohony posouvají technologický vývoj, zároveň vedou k udržitelnosti a energetické efektivitě. Ve čtyřech níže popsaných případech došlo k nahrazení spalovacího motoru elektromotorem, což přineslo několik významných výhod – kromě již zmíněné energetické účinnosti i zpětnou energetickou využitelnost, tišší provoz, nižší provozní náklady a vyšší šetrnost k životnímu prostředí.

2.4.1 EDumper Komatsu HD 605-7

EDumper (Obr. 8) je plně elektrifikované těžební vozidlo, které se vyznačuje nulovými emisemi při provozu a tím i nižším dopadem na životní prostředí, zároveň je tento elektromobil vysoce výkonný. Komatsu HD 605-7, vyráběné švýcarskou firmou Emining, je nákladní vozidlo se spalovacím dieselovým motorem o výkonu 575 kW. Tataž firma však původní vozidlo Komatsu HD 605-7 předělala na plně elektrifikované těžební vozidlo. [34]

EDumper má místo palivové nádrže akumulátor s kapacitou 600 kWh, díky čemuž se jedná o největší elektromobil na světě, s největší instalovanou baterií ve vozidle. Dobíjení je řešeno pomocí výškového rozdílu, který musí eDumper při práci překonat. Při přepravě horniny z výše položené těžební oblasti do zpracovatelského závodu v nižší nadmořské výšce se pomocí rekuperace brzděné energie při cestě dolů vozidlo plně nabije, nahromaděná elektrická energie je posléze využita při jízdě prázdného vozidla zpět nahoru. Firma deklaruje, že přechodem na elektro-vozidla se sníží roční produkce oxidu uhličitého až o 130 tun. Za předpokladu, že eDumper přepraví přes 300 000 tun horniny ročně, se podle odhadu EMPA (švýcarská výzkumná instituce) za 10 let ušetří až 1 300 tun oxidu uhličitého a 500 000 litrů nafty. [34, 35]

Další výhodou je, že díky chytře využitému rozdílu nadmořské výšky a přesouvané hmotnosti horniny (váhový rozdíl naložené a prázdné korby je přes 63 tun), stačí vozidlo nabít pouze jednou. Tento model přestavby posloužil jako vzor k předělání více než 200 dalších stavebních strojů, které jsou dnes taktéž využívány. Na obrázku níže (Obr. 8) je zachycen eDumper Komatsu HD 605-7 při práci v lomu. [34, 35]



Obr. 8: EDumper Komatsu HD 605-7 [34]

2.4.2 Automobilová flotila rozvozové služby

Rozvážková společnost Rohlik.cz, která se specializuje na dodávky potravin a dalšího zboží přímo k zákazníkům, využívá k doručení objednávek částečně elektromobily. V současnosti má tato firma ve vozovém parku 90 aut s elektropohonem a 80 vozidel na CNG. Oba typy automobilů používá výhradně pro doručování ve městech, a to konkrétně v Praze a Brně. Společnost oznámila, že v roce 2025 chce rozvážet objednávky výhradně pomocí elektromobilů, vzhledem k nedostatku automobilů a problémům s rozvojem nabíjecích infrastruktur je však reálný až rok 2027. Cílem bezemisní městské logistiky je nabíjení vozidel přes noc, tak aby přes den nevznikaly prostoje při nabíjení. V současnosti využívá společnost Rohlik.cz automobil Maxus eDeliver 3 od čínského výrobce SAIC Motor s výkonem motoru 90 kW. Baterie těchto automobilů mají kapacitu 35 resp. 52,2 kWh (kapacita se odvíjí podle verze elektromobilu), což podle WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures) znamená dojezd až 344 km. Vzhledem k tomu, že kurýři této rozvozové služby ujedou denně přibližně 250 km, vystačí teoreticky jedno nabití auta na celou směnu. [36, 37]

Kromě společnosti Rohlik.cz využívají elektromobilitu ke svému podnikání v ČR také dopravní společnosti jako DPD, DoDo či Alza. Tyto společnosti mají ve své flotile velké zastoupení vozidel s elektropohonem, tento vozový park chtějí i nadále rozšiřovat. [38]

2.4.3 Elektro-mobilní taxi

V Kalifornii, konkrétně v San Franciscu, provozují v současnosti dvě společnosti (Cruise a Waymo) autonomní taxi vozidla poháněná výhradně elektrickým pohonem. Firma Waymo má ve svém vozovém parku všechna auta značky Jaguar, konkrétně typ I-PACE. Tato firma uvádí, že vozidla typu I-PACE produkují v USA méně uhlíkových emisí než vozidla se spalovacím motorem. Společnost Cruise podporovaná General Motors se snaží získávat energii pro svou plně elektrickou flotilu z obnovitelných zdrojů, konkrétně ze solárních panelů. Automobily Cruise mají nulové emise a jsou ze 100 % poháněny energií z obnovitelných zdrojů, bohužel však z důvodu několika nešťastných incidentů, kdy došlo ke srážce s chodci, je provoz těchto vozidel pozastaven. [39, 44]

2.4.4 Monarch Tractor

Americká společnost Monarch Tractor se zaměřuje na vývoj a od roku 2022 i na sériovou výrobu autonomních elektro-traktorů (MK-V) a další zemědělské techniky, v zemědělských strojích také nahrazují tradiční spalovací motory elektromotory. Firma se snaží snižovat emise, zvyšovat úspory zemědělců a současně maximalizovat potenciál farem. Podle informací, které jsou uvedeny na stránkách firmy, se za využití zemědělských strojů, které jsou poháněny elektromotorem, sníží roční produkce CO₂ až o 54 tun, roční provozní náklady klesnou až o 18 000 dolarů a ušetří se v průměru až 7 950 litrů nafty na jeden traktor. [40]

Autonomní traktory společnosti Monarch jsou vybaveny šesti čipy NVIDIA Jetson Xavier NX, čímž se při jejich provozu uplatňuje AI (umělá inteligence). Díky umělé inteligenci WingspanAI má zemědělec zprávy nejen o výkonnosti samotného traktoru, ale také o diagnostice a údržbě, čímž se snižují náklady na budoucí opravy. Platforma NVIDIA AI současně umožňuje traktorům na poli pracovat se strojovým viděním v situacích, kdy není k dispozici GPS, jelikož je každý traktor MK-V opatřen dvěma 3D a šesti běžnými kamerami. Traktory kombinují mechanizaci, automatizaci a analýzu dat, čímž zlepšují stávající operace, snižují nedostatek pracovních sil v zemědělství a maximalizují výnosnost. Monarch Tractor není jedinou firmou, která se zabývá autonomními elektrotraktory, obdobné stroje vyvíjí například společnosti John Deere, Ztractor, Agxeed či Yanmar. [40, 41]

3 Cíl práce

Cílem diplomové práce je porovnat produkci emisí u vozidel se spalovacím motorem a elektromotorem, na základě čehož bude následně sledován dopad obou pohonů na životní prostředí. Tohoto cíle bude dosaženo prostřednictvím dvou dílčích úkonů:

- analýza současného stavu emisí,
- návrh řešení problematiky.

4 Metodika

V první, a tudíž literární části diplomové práce, byl studován současný stav emisí, popis konstrukce a tvorba emisí vozidel, které jsou poháněny spalovacím motorem a elektromotorem. Současně bylo popsáno další využití spalovacích motorů a jejich možné nahrazení elektromotorem v případě stavebních dopravních prostředků. Ve druhé části diplomové práce bude následně navrženo řešení problematiky emisí a bude vypočteno celkové množství vyprodukovaného CO₂ během celého životního cyklu vozidel.

Pro stanovení emisí z výroby automobilů se spalovacím motorem bude vypočten průměr dostupných dat vyprodukovaného oxidu uhličitého během výroby vozidla, zároveň bude stanoven celosvětový průměr vyprodukovaného CO₂ při výrobě jednoho automobilu se spalovacím motorem. Pro stanovení emisí z výroby paliva bude přepočteno množství vyprodukovaného CO₂ na jeden litr (průměr pro naftu a benzín), aby bylo možné tyto emise vztáhnout na ujeté kilometry. Emise vznikající spalováním paliva budou vypočteny za využití průměrné spotřeby automobilu a množství vzniklého CO₂ podle metodiky EPA. Emise z údržby automobilu budou stanoveny na základě dostupných dat a budou následně přepočteny na ujeté kilometry.

Pro výpočet emisí vznikající výrobou elektromobilu budou taktéž využity dostupné hodnoty vyprodukovaného oxidu uhličitého během výroby vozidla a také množství emisí vznikající výrobou akumulátoru. Pro stanovení emisí z výroby elektřiny, která je nutná pro nabíjení vozidla, bude použit celosvětový průměr energetického mixu a průměr emisí vznikající výrobou 1 kWh. Za využití průměrné spotřeby energie elektromobilu bude následně vypočteno množství emisí na ujeté kilometry. V případě výpočtu emisí z údržby elektromobilu bude postupováno obdobně jako u spalovacího motoru.

4.1 Emise automobilů se spalovacím motorem

Hodnoty vyprodukovaného CO₂ u automobilů se spalovacím motorem a elektromotorem byly porovnány pro tři fáze životnosti (160 000, 280 000 a 500 000 ujetých km). První fáze (tj. 160 000 ujetých km) představuje běžnou životnost baterie elektromobilu. 280 000 km je průměrná hodnota najetých kilometrů u vozidel, které jsou pravidelně udržovány a neprojdou žádnými závažnými nehodami či poškozeními. Poslední hodnota (tj. 500 000 km) je průměrem maximální možné životnosti, kterého dosahují automobily se spalovacím motorem.

4.1.1 Emise z výroby automobilů se spalovacím motorem

Během stanovování emisí vznikající při výrobě aut byly zaznamenány tři problémy. Prvním problémem je, že vzhledem k tomu, že každý automobil se vyrábí jiným způsobem, neexistuje obecný vzorec, jakým by bylo možné emise během výroby vypočítat. Druhým problémem je, že mnozí výrobci automobilů uvádějí pouze emise spojené s vlastní výrobou, ale už nezapočítávají emise vyprodukované při výrobě externě dodávaných součástí. S tímto problémem se pojí třetí bod, a to fakt, že některé automobily zveřejňují pouze celkovou uhlíkovou stopu (tzv. metodika Well-to-wheels), a proto není možné určit, jaké množství emisí se vyprodukuje v jednotlivých výrobních krocích.

Jedna z mála společností, která má tato data zveřejněna, je společnost Toyota Motor Manufacturing (známé dříve jako TPCA). Toyota vyprodukuje jedním vyrobeným automobilem se spalovacím motorem, při zahrnutí všech aspektů souvisejících s výrobou vozidla (např. spotřeba elektrické energie během výroby, montáže či na lakovně, spotřeba plynu při svařování, případně spotřeba pohonné hmoty při testování vozidla), přibližně 2 002 kg oxidu uhličitého. Koncern Volkswagen uvádí pouze informaci, že při výrobě jednoho auta, konkrétně vozu Golf ve verzi se vznětovým motorem, vzniká přibližně 1 890 kg CO₂ a laboratoř Argonne v USA uvádí, že se během výroby v Americe automobilu se spalovacím motorem vyprodukuje přibližně 2 013 kg CO₂.

Hodnoty publikované společnostmi Toyota, Volkswagen a také národní laboratoří Argonne ve Spojených státech jsou velice podobné, tj. uvádějí, že se během výroby jednoho automobilu se spalovacím motorem vyprodukuje kolem 2 tun CO₂. Oproti tomu firma Nissan uvádí až 5 200 kg vyprodukovaného CO₂ na jeden automobil své značky. [53, 54, 55]

Vzhledem k velkým číselným odchylkám a určité netransparentnosti bylo shromážděno několik dalších údajů, které jsou zaznamenány v Tab. 3. V tabulce jsou uvedeny dostupné hodnoty oxidu uhličitého vyprodukovaného během výroby konkrétního vozidla, případně je uvedena průměrná hodnota emisí, které vznikají v daném výrobním závodě. Za využití dostupných dat byl vypočten celosvětový průměr vyprodukovaného množství oxidu uhličitého při výrobě jednoho automobilu se spalovacím motorem (6 080 kg).

Tab. 3: Přehled emisí vznikajících při výrobě automobilu se spalovacím motorem [53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 74]

| Zdroje uvádějící množství vzniklého CO ₂ na výrobu jednoho vozu | Množství produkovaného CO ₂ během výroby [kg] |
|--|--|
| [53] Toyota Motor Manufacturing (průměrná hodnota) | 2 002 |
| [53] Volkswagen Golf | 1 890 |
| [54] Průměr podle Národní laboratoře Argonne, USA | 2 013 |
| [55] Nissan Motor Co. | 5 200 |
| [59] Mercedes-Benz Group (průměrná hodnota) | 7 800 |
| [56] Hyundai Kona | 6 000 |
| [56] Audi Q7 | 10 000 |
| [56] Průzkum univerzity Tsinghua pro výrobu v Číně | 9 700 |
| [58] Ricardo studie pro ICEV | 5 600 |
| [57] Studie Státní klíčové laboratoře pro čínský trh | 9 172 |
| [54] Průměr podle Rakouského automobilového institutu | 7 500 |
| Průměrná hodnota | 6 080 |

4.1.2 Emise z výroby paliva

Těžba, přeprava, rafinace ropy na palivo a následná distribuce tvoří 15 až 40 % veškerých emisí skleníkových plynů. Podle studií EU rafinace ropy a její distribuce zvyšuje emise oxidu uhličitého v případě benzínu o 10,3 gramu CO_{2ekv}/MJ a o 5,4 v případě nafty, v Tab. 4 jsou uvedeny přepočty těchto hodnot na kg/bbl a kg/l. Tyto hodnoty emisí z výroby paliva ovšem odpovídají pouze Evropě a Severní Americe, mimo tyto kontinenty jsou emise vyšší - představují až polovinu celosvětové produkce. Pro další výpočty je dále počítáno pouze s hodnotami pro Evropu a Sev. Ameriku, vypočtené množství CO₂ (viz Tab. 4) je tedy nižší než skutečné množství emisí vznikající při výrobě paliva. V Tab. 5, Tab. 6 a Tab. 7 jsou zaznamenány přepočty pro 3 různé fáze celého životního cyklu automobilu (pro 160 000, 280 000 a 500 000 ujetých km). Hodnota průměrné spotřeby automobilu je převzata z výpočtu v kapitole 4.1.3.1. [50]

Tab. 4: Množství emisí vznikajících při výrobě a přepravě benzínu a nafty [50]

| Typ pohonné hmoty | Celosvětová průměrná vážená hodnota | Množství CO ₂ [kg/bbl] | Množství CO ₂ [kg/l] |
|-------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Benzín | 10,3 gramu CO _{2ekv} /MJ | 63 | 0,396 kg/l |
| Nafta | 5,4 gramu CO _{2ekv} /MJ | 33 | 0,208 kg/l |

Tab. 5: Množství CO₂ vznikajícího při výrobě paliva během životního cyklu auta při ujetí 160 000 km

| Typ pohonné hmoty | Spotřeba automobilu [l/km] | Množství CO ₂ vzniklé výrobou [kg/l] | Počet ujetých km za celou dobu životnosti [km] | Množství CO ₂ [kg] |
|-------------------|----------------------------|---|--|-------------------------------|
| Benzín | 0,064 | 0,396 | 160 000 | 3 679 |
| Nafta | 0,059 | 0,208 | 160 000 | 2 127 |

Z Tab. 5 vyplývá, že v případě vozidla s benzínovým motorem se výrobou paliva vyprodukuje během životní cyklu vozidla přibližně 3 679 kg CO₂ (při ujetí 160 000 km) a v případě automobilu s naftovým motorem 2 127 kg CO₂.

Tab. 6: Množství CO₂ vznikajícího při výrobě paliva během životního cyklu auta při ujetí 280 000 km

| Typ pohonné hmoty | Spotřeba automobilu [l/km] | Množství CO ₂ vzniklé výrobou [kg/l] | Počet ujetých km za celou dobu životnosti [km] | Množství CO ₂ [kg] |
|-------------------|----------------------------|---|--|-------------------------------|
| Benzín | 0,064 | 0,396 | 280 000 | 6 437 |
| Nafta | 0,059 | 0,208 | 280 000 | 3 722 |

Z Tab. 6 je zřejmé, že v případě vozidel pohaněných benzínem se během životního cyklu vozidla (při ujetí 280 000 km) vyprodukuje výrobou paliva přibližně 6 437 kg CO₂ a v případě vozidla s naftou 3 722 kg CO₂.

Tab. 7: Množství CO₂ vznikajícího při výrobě paliva během životního cyklu auta při ujetí 500 000 km

| Typ pohonné hmoty | Spotřeba automobilu [l/km] | Množství CO ₂ vzniklé výrobou [kg/l] | Počet ujetých km za celou dobu životnosti [km] | Množství CO ₂ [kg] |
|-------------------|----------------------------|---|--|-------------------------------|
| Benzín | 0,064 | 0,396 | 500 000 | 11 495 |
| Nafta | 0,059 | 0,208 | 500 000 | 6 646 |

Podle dat v Tab. 7 činí průměrné množství CO₂, které se vyprodukuje výrobou pohonných hmot během celého životního cyklu automobilu (500 000 km), 11 495 kg v případě benzínu a 6 646 kg v případě nafty.

4.1.3 Emise z provozu automobilů se spalovacím motorem

U automobilů se spalovacím motorem vznikají emise při jeho údržbě, během samotné jízdy, při spalování paliva a také při brždění a opotřebování pneumatik. Vznik těchto emisí a jejich výpočet je uveden v následujících podkapitolách.

4.1.3.1 Emise ze spalování paliva

U spalovacích motorů dochází při spalování paliva během jízdy k tvorbě CO₂. Podle metodiky EPA vzniká z 1 gallonu benzínu přibližně 8 788 gramů CO₂ a 10 084 gramů CO₂ se vyprodukuje z 1 gallonu nafty, viz (4) a (5). Množství oxidu uhličitého je přímo úměrné průměrné spotřebě automobilu a lze jej vypočítat pomocí vztahů (6) a (7), kde x značí množství vyprodukovaného CO₂ na jeden kilometr jízdy při průměrné spotřebě (y) na sto ujetých kilometrů pro zážehový a vznětový motor. [46]

$$x_{\text{benzín,EPA}} [\text{g/gallon}] = 8\,788 \quad (4)$$

$$x_{\text{nafta,EPA}} [\text{g/gallon}] = 10\,084 \quad (5)$$

$$x_{\text{benzín}} [\text{g/km}] = \frac{x_{\text{benzín,EPA}}}{3,7584} \cdot y_{\text{benzín}} = \frac{8\,788}{3,7584} \cdot y_{\text{benzín}} \quad (6)$$

$$x_{\text{nafta}} [\text{g/km}] = \frac{x_{\text{nafta,EPA}}}{3,7584} \cdot y_{\text{nafta}} = \frac{10\,084}{3,7584} \cdot y_{\text{nafta}} \quad (7)$$

Tab. 8: Přehled vybraných automobilů se zážehovým motorem a jejich spotřeba benzínu [75]

| Značka | Model automobilu | Objem motoru [ccm] | Spotřeba automobilu [l/100 km] |
|--|------------------|--------------------|--------------------------------|
| Kia | Ceed | 1396 | 7,83 |
| Dacia | Sandero | 1598 | 6,15 |
| VW | Caddy | 1390 | 2,18 |
| Hyundai | i30 cw | 1398 | 7,57 |
| Opel | Crossland | 1200 | 7,32 |
| Ford | FOCUS II - 74kW | 1596 | 7,25 |
| Škoda | Fabia Combi II | 1197 | 5,27 |
| Škoda | Fabia II Combi | 1390 | 6,79 |
| Toyota | Auris | 1598 | 7,89 |
| Hyundai | i20 | 1248 | 5,54 |
| Škoda | Octavia Combi II | 1798 | 6,37 |
| Průměrná hodnota ($y_{\text{benzín}}$) | | | 6,4 |

Tab. 9: Přehled vybraných automobilů se vznětovým motorem a jejich spotřeba nafty [75]

| Značka | Model automobilu | Objem motoru [ccm] | Spotřeba automobilu [l/100 km] |
|----------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------------|
| Ford | MONDEO combi TDCI | 1998 | 6,16 |
| VW | Passat | 1998 | 5,81 |
| Peugeot | 3008 | 1997 | 4,40 |
| Škoda | Octavia 1.9 TDI | 1896 | 6,39 |
| Škoda | Octavia combi II 2,0 TDI | 1968 | 5,90 |
| Škoda | Octavia combi | 1896 | 4,98 |
| Hyundai | I30 | 1582 | 5,28 |
| Škoda | Octavia | 1598 | 4,80 |
| Ford | Mondeo | 1997 | 6,79 |
| Škoda | Octavia Combi | 1896 | 5,44 |
| Peugeot | 307 Break | 1997 | 5,43 |
| Ford | Focus II Turnier | 1997 | 6,22 |
| Ford | Mondeo Combi 2,2 | 2200 | 6,30 |
| Hyundai | i30 cw | 1582 | 5,67 |
| Ford | Transit | 2000 | 7,82 |
| Chevrolet | Cruze SW 2.0 VCDi LTZ | 1998 | 7,72 |
| Škoda | Superb Combi | 1968 | 5,59 |
| Průměrná hodnota (y_{nafta}) | | | 5,9 |

Tab. 10: Množství vyprodukovaného CO₂ podle spotřeby automobilu

| Typ pohonné hmoty | Průměrná spotřeba paliva ($y_{benzín}, y_{nafta}$) [l/100 km] | Průměrná spotřeba paliva [l/km] | Množství CO ₂ ($x_{benzín}, x_{nafta}$) [g/km] |
|-------------------|---|---------------------------------|---|
| Benzín | 6,4 | 0,0639 | 149,4 |
| Nafta | 5,9 | 0,0585 | 156,9 |

Průměrná spotřeba pohonných hmot (y) byla stanovena jako průměr z dostupných hodnot pro různé typy automobilů (viz Tab. 8 a Tab. 9). Za použití průměrné spotřeby paliva (y) a vztahů (6) a (7) bylo stanoveno množství vyprodukovaného CO₂ na 1 ujetý km (Tab. 10), tj. při spalování benzínu vzniká přibližně 149,4 g CO₂ na 1 km jízdy, v případě nafty 156,9 g/km. Vypočtené hodnoty byly následně použity pro výpočet emisí v závislosti na ujetých kilometrech a jsou zaznamenány v Tab. 11.

Tab. 11: Přehled emisí oxidu uhličitého v závislosti na ujeté vzdálenosti

| Typ pohonné hmoty | Množství CO ₂ (x _{benzín} , x _{nafta}) [g/km] | Množství CO ₂ při ujetí 160 000 km [kg] | Množství CO ₂ při ujetí 280 000 km [kg] | Množství CO ₂ při ujetí 500 000 km [kg] |
|-------------------|---|--|--|--|
| Benzín | 149,4 | 23 906 | 41 829 | 74 695 |
| Nafta | 156,9 | 25 112 | 43 946 | 78 475 |

4.1.3.2 Emise z brzd a pneumatik automobilů se spalovacím motorem

Kromě tvorby CO₂ během užívání automobilu se při brždění a opotřebování pneumatik tvoří také pevné částice (PM). Podle dostupných studií přispívají vzniklé částice k přibližně 11 % všech PM vznikajících užíváním automobilu. [47, 64]

Nejdůležitějšími faktory ovlivňující množství pevných částic (PM_{2,5} a PM₁₀) jsou intenzita dopravy, typ a stav povrchu vozovky, zimní/letní období, hmotnost, rychlost a aerodynamický tvar vozidla, teplota a stav údržby brzd a styl jízdy (tj. intenzita brždění). Vzhledem k velkému množství uvedených faktorů (a tudíž i proměnných) je patrné, že nelze jednoduše stanovit emise vznikající bržděním a opotřebováním pneumatik. Pro představu lze uvést alespoň orientační hodnoty – tj. při brždění vzniká přibližně 0,07 g PM na 100 ujetých km a opotřebováním pneumatik 0,1 g PM na 100 km. Aby nedocházelo ke zkreslování dat celé práce, nebudou tyto hodnoty dále použity. [47, 48, 64]

Z výše uvedených faktorů ovlivňující množství vznikajících pevných částic je pouze hmotnost vozidla parametrem, který závisí na typu pohonu, ostatní faktory jsou vždy stejné neohledně na typ pohonu (tvar vozidla a jeho aerodynamický odpor není brán v úvahu, jelikož je navázán na další faktory, kterými jsou např. rychlost jízdy a povětrnostní podmínky). Hmotnost vozidel se spalovacím motorem a elektromotorem je zřetelně odlišná, při porovnání vozidel stejných nebo podobných parametrů je automobil se spalovacím motorem přibližně o 15 % lehčí. Váha vozidla přispívá k tvorbě pevných částic přibližně z 20 %, a za konstelace, že automobil se spalovacím motorem váží o 15 % méně, vyprodukuje tento typ vozidla při stejné ujeté vzdálenosti o 3 % méně PM z brzd a pneumatik než elektromobil, viz (8). [47, 48, 64, 65]

$$0,15 \cdot 0,20 = 0,03 \quad (8)$$

4.1.3.3 Emise z údržby automobilů se spalovacím motorem

Nedílnou součástí životního cyklu vozidla je i jeho servis, který je potřeba provádět v pravidelných intervalech. K úkonům, které jsou nejčastěji zahrnuty v servisní prohlídce, se používají komponenty, při jejichž výrobě taktéž vznikají emise CO₂. Předpokládané množství oxidu uhličitého vznikajícího během servisních úkonů vychází z japonské studie a je uvedeno v Tab. 12. V Tab. 13 jsou jednotlivé servisované části automobilu přepočítány na množství CO₂ pro jednotlivé cykly životnosti vozidla. [49]

Tab. 12: Přehled servisovaných součástí a jejich průměrné emisní zátěže [49]

| Servisovaná „část“ | Interval údržby [km] | Množství CO ₂ [kg/výměna] | Množství CO ₂ [kg/km] |
|--------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| pneumatiky | 40 000 | 108,00 | 0,0027 |
| baterie | 50 000 | 19,50 | 0,0039 |
| chladící kapalina | 27 000 | 7,03 | 0,0026 |
| motorový olej | 10 000 | 3,22 | 0,0032 |

Tab. 13: Přehled servisovaných součástí a jejich průměrné emisní zátěže

| Servisovaná „část“ | Množství CO ₂ po ujetí 160 000 km [kg] | Množství CO ₂ po ujetí 280 000 km [kg] | Množství CO ₂ po ujetí 500 000 km [kg] |
|--------------------|---|---|---|
| pneumatiky | 432 | 756 | 1 350 |
| baterie | 62 | 109 | 195 |
| chladící kapalina | 41 | 73 | 131 |
| motorový olej | 52 | 90 | 161 |
| Σ | 587 | 1 028 | 1 837 |

Z Tab. 13 vyplývá, že ve chvíli, kdy má automobil najeto 160 000 km je běžnými servisními úkony vyprodukováno přibližně 587 kg CO₂, po ujetí 280 000 km pak 1 028 kg CO₂ a 1 837 kg CO₂ je vyprodukováno ve chvíli, kdy má automobil najetých 500 000 km.

4.1.4 Emise z likvidace a recyklace automobilů se spalovacím motorem

Poslední fáze životního cyklu automobilu zahrnuje jeho demontáž, separaci materiálů a recyklační procesy. Čelní sklo, baterie, čalounění, nárazníky, boční dveře, palubní deska a další součásti jsou efektivně recyklovány. Normy pro recyklaci automobilů nejsou po celém světě stejné - zatímco v EU a Velké Británii jsou pravidla pro odstraňování znečištění a recyklaci velice přísná, v jiných státech jsou normy a regulace

nížší, případně žádná. V EU musí být 90 – 95 % materiálu z automobilu recyklováno. Při průměrné hmotnosti vozidla 1 500 kg lze přibližně 42 % znovu použít (630 kg) a 51 % recyklovat (765 kg), zbytek je likvidován. [60]

Díky vysoké míře znovuvyužití součástí automobilu se spalovacím motorem není publikováno příliš mnoho studií zaměřených na emise vznikající likvidací automobilu po skončení jeho životnosti, případně bývají tato data zahrnuta do celkových emisí vznikajících při výrobě vozu. Obecně lze proto stanovit pouze celosvětový průměr pro běžné činnosti, které jsou s likvidací automobilu spojené. Hodnoty CO₂ pro jednotlivé likvidační procesy jsou zaneseny do Tab. 14 - z tabulky vyplývá, že likvidací vozu se spalovacím motorem vzniká 66 kg oxidu uhličitého. [49]

Tab. 14: Množství CO₂ vznikající při likvidaci vozu po konci životnosti [49]

| Proces | Množství CO ₂ vznikající daným procesem [kg] |
|------------------------|---|
| Demontáž | - |
| Slisování/drcení | 24 |
| Transport mezi procesy | 4 |
| Skládkování | 38 |
| Σ | 66 |

Výpočet množství CO₂, které se díky recyklaci nevyprodukuje, byl proveden pro čtyři nejvýznamnější typy materiálů (ocel, hliník, plast a sklo). Tyto materiály tvoří 65 % celého vozu, vypočtené hodnoty jsou zaneseny v Tab. 15.

Tab. 15: Množství CO₂, které nevzniká díky recyklaci vozidel [60, 61, 62, 63]

| Materiál | Materiálové zastoupení v automobilu [%] | Množství ušetřeného CO ₂ [kg/auto] |
|----------|---|---|
| Ocel | 47 | 542,9 |
| Plast | 8 | 62,4 |
| Hliník | 7 | 756,0 |
| Sklo | 3 | 8,1 |

Při výrobě 1 kg oceli se uvolní přibližně 2,75 kg CO₂. Vzhledem k tomu, že automobil tvoří přibližně 47 % oceli se při jeho výrobě vyprodukuje 1 939 kg CO₂. Když je však vozidlo recyklováno, tak vzniká pouze 1 396 kg (energetická náročnost recyklace oceli je 72 %), tzn. procesem recyklace se sníží množství vyprodukovaného CO₂ o 543 kg/auto. [60, 61]

V porovnání s ocelí se výrobou hliníkových komponentů vyprodukuje až třikrát více emisí oxidu uhličitého. Recyklace hliníkových částí se pohybuje kolem 90 – 95 % (pro další výpočty je uvažována hodnota 90 %), proto vzhledem k tomu, že váha hliníku v automobilu činí 105 kg, se 94,5 kg hliníku recykluje. Při výrobě 1 kg hliníku vzniká 8 kg CO₂, z čehož vyplývá, že recyklací jednoho automobilu se ušetří až 756 kg CO₂. [60, 61]

Sklo lze recyklovat v průměru až z 90 %. Při výrobě 1 kg skla vzniká přibližně 200,58 g CO₂, proto za předpokladu, že ICEV obsahuje 45 kg skla, z čehož je možné 40,5 kg recyklovat (90 % z 3 % hmotnosti vozu), se recyklací jednoho vozidla nevyprodukuje 8 123,49 g (resp. 8,12 kg) CO₂. [60, 62]

Plastové komponenty (z polypropylenu, ABS, polykarbonátu, PVC, HDPE, polyuretanu aj.) se u automobilů recyklují pouze z méně než 20 %. Na 1 kg vyrobeného plastu na fosilní bázi se uvolní v průměru 2,6 kg oxidu uhličitého. Když je uvažováno, že váha automobilu činí přibližně 1 500 kg a vozidlo obsahuje 8 % plastových komponent, tak se recyklací ušetří až 62,4 kg CO₂. [60, 63]

Ze součtu vypočtených hodnot CO₂ pro jednotlivé materiály vyplývá, že se recyklací průměrného automobilu se spalovacím motorem ušetří až 1 367 kg CO₂.

4.2 Emise elektromobilů

V současné době vyprodukuje elektromobil opouštějící výrobní linku zhruba dvojnásobně až trojnásobně více emisí než automobil se spalovacím motorem, což je způsobeno především emisemi z výroby samotného akumulátoru. Pro přesnější výsledky byl proveden samostatný výpočet emisí z výroby elektromobilu bez akumulátoru a výpočet emisí pouze z výroby akumulátoru. [56]

4.2.1 Emise z výroby elektromobilů

Stejně jako v kapitole 4.1.1 byly při výrobě vozidla s elektromotorem zaznamenány tři problémy, tj. neexistuje obecný výpočet pro stanovení emisí během výroby, mnozí výrobci automobilů uvádějí pouze emise spojené přímo s výrobou a problém sumarizace emisí metodikou Well-to-wheels. V této kapitole je proto postupováno obdobně jako v případě vozidel se spalovacími motory (viz 4.1.1), výpočet byl proveden samostatně pro vozy bez baterií.

Na základě počtu vyrobených vozidel k roku 2022 (1 313 800) a množství výrobou vyprodukovaných emisí CO₂ (3 700 000 000 kg) bylo vypočteno, že společnost Tesla vytvoří na jeden vyrobený elektromobil přibližně 2 816 kg oxidu uhličitého (do této hodnoty nejsou započteny emise z výroby akumulátoru). [56, 69]

Americká automobilová společnost Rivian, která je zaměřena na výrobu off-road elektromobilů, vyprodukuje podle zveřejněných dat 9 270 kg CO₂ výrobou jednoho vozu. [70, 71]

Další údaje z dostupných studií a článků uvádějící konkrétní hodnoty vyprodukovaného oxidu uhličitého jsou zaznamenány v Tab. 16. Výsledný celosvětový průměr vytvořeného oxidu uhličitého činí při výrobě jednoho elektromobilu bez akumulátoru 7 565 kg.

Tab. 16: Přehled vyprodukovaného CO₂ při výrobě elektromobilu bez baterie. [54, 56, 57, 58, 69, 70, 71, 74, 79]

| Zdroj/typ vozu | Množství CO ₂ vznikající během výroby jednoho vozu bez baterie [kg] |
|---|--|
| [56, 69] Průměr modelů firmy Tesla | 2 816 |
| [54] Průměr podle Státního ústavu USA | 2 244 |
| [56] BYD Yuan EV360 | 11 814* |
| [57] Studie State Key Laboratoře pro čínský trh | 11 713 |
| [58] Ricardo studie pro BEV | 8 740 |
| [70, 71] Průměr modelů firmy Rivian | 9 270 |
| [56] Hyundai Kona electric | 5 000 |
| [74] Institut automobilového inženýrství v Rakousku | 4 247** |
| [79] Průměr ze 30 regionů v Číně | 12 237 |
| Průměrná hodnota | 7 565 |

*Společnost BYD uvádí emise včetně akumulátorů, zveřejněná hodnota (18 000 kg) byla proto korelována odečtem vypočtené průměrné hodnoty emisí z výroby baterie o kapacitě 42,6 kWh (6 186 kg, viz Tab. 18).

**Celková hodnota množství CO₂ zveřejněná Institutem automobilového inženýrství v Rakousku (14 000 kg) byla taktéž upravena odečtením emisního zatížení z výroby průměrného akumulátoru o kapacitě 67,2 kWh (9 753 kg, viz Tab. 18).

4.2.2 Emise z výroby baterií

V současnosti jsou baterie pro elektromobily vyráběny převážně v Asii, konkrétně v Číně (56 % celkové produkce). Čína, ačkoli se posledních několik let snaží plnit emisní normy a chovat se vyspěle v environmentálních otázkách, však často zveřejňuje nepravdivé informace k vyprodukovanému množství emisí, a proto jsou data mnohdy zavádějící a zkreslená. Při těžbě materiálu je zároveň využívána zastaralá technika neplnící emisní normy a odpad je bez filtrace vypouštěn do řek. Bohužel je tomu obdobně i při zpracování materiálu v továrnách a jen těžbou a zpracováním vzniká přes 70 kg CO₂ – tento trend vysokého množství emisí je naneštěstí zachován i při výrobě baterií. [56, 72]

Podle Švédského výzkumného institutu pro životní prostředí vznikne při výrobě lithium-ion baterie přes 586 MJ energie na 1 kWh akumulátoru. V Tab. 17 jsou uvedeny tři regiony, které jsou dominantní ve výrobě baterií. Čínský (56 %), korejský (26 %) a americký trh (6 %) vyrobí až 88 % všech baterií na světě. Při uvážení průměrného energetického mixu Číny vzniká v tomto regionu výrobou 1 kWh akumulátoru 159 kg CO₂ (viz Tab. 17). [56]

Tab. 17: Přehled množství CO₂ vyprodukovaného při výrobě 1 kWh baterie ve významných regionech [56]

| Region | Poměr vyrobených baterií (celosvětově) [%] | Množství vyprodukovaného CO ₂ na výrobu 1 kWh baterie [kg] |
|---------------|--|---|
| Čína | 56 | 159 |
| USA | 6 | 112 |
| Jižní Korea | 26 | 123 |
| Vážený průměr | | 145,2 |

Průměrné množství vyprodukovaného CO₂ na výrobu 1 kWh bylo stanoveno na základě váženého průměru hodnot z Tab. 17 (145,2 kg CO₂) - vybrané regiony vyprodukují výrobou baterií největší podíl emisí, a právě tyto hodnoty byly použity jako váhové faktory při výpočtu váženého průměru. Za využití kapacit akumulátorů zveřejněných v katalozích automobilek a množství CO₂ vznikající výrobou 1 kWh baterie bylo stanoveno průměrné množství oxidu uhličitého vznikající výrobou jedné baterie (Tab. 18). Na základě dostupných dat byla následně stanovena průměrná hodnota CO₂ vyprodukovaná výrobou jedné baterie o kapacitě 67,2 kWh (9 753 kg). [56, 73]

Tab. 18: Přehled množství CO₂ vyprodukovaného při výrobě baterie elektromobilu [49, 56]

| Model | Kapacita akumulátoru vozu [kWh] | Množství vyprodukovaného CO ₂ na výrobu 1 baterie [kg] |
|-------------------|---------------------------------|---|
| Škoda Citigo iV | 39,8 | 5 779,0 |
| Hyundai Ioniq | 38,3 | 5 561,2 |
| Hyundai Kona | 64,0 | 9 292,8 |
| Jaguar I-Pace 90 | 90,0 | 13 068,0 |
| Tesla Model S | 87,5* | 12 705,0 |
| Tesla Model 3 | 62,3** | 9 046,0 |
| BYD Yuan EV360 | 42,6*** | 6 185,5 |
| Audi e-tron | 95,0 | 13 794,0 |
| Mercedes-benz EOC | 85,0 | 12 342,0 |
| Průměrná hodnota | 67,2 | 9 752,6 |

*Průměrná hodnota nabízených kapacit baterií (75 a 100 kWh).

**Průměrná hodnota nabízených kapacit baterií (50, 62 a 75 kWh).

***Průměrná hodnota nabízených kapacit baterií (32 a 53,2 kWh).

4.2.3 Emise z provozu elektromobilů

4.2.3.1 Emise z brzd a pneumatik elektromobilů

Z kapitoly 4.1.3.2 týkající se automobilů se spalovacím motorem vyplynulo, že nelze stanovit množství vyprodukovaných emisí během životního cyklu ani při ujetí pouze určité vzdálenosti (např. 100 ujetých km). Lze proto pracovat pouze s poměrem vyprodukovaných pevných částic pro elektromobily (1,03:1), vzhledem však k nízkým a málo průkazným hodnotám nebude tento podíl emisí započítán do celkové bilance v závěru práce.

4.2.3.2 Emise z výroby elektřiny na nabíjení

To, jak jsou elektromobily oproti autům se spalovacím motorem výhodné, záleží také na energetickém mixu dané země (tj. na tom, z čeho se elektřina vyrábí) resp. na místě, kde se auto dobíjí. Pro výpočet emisí byla nejprve stanovena energetická náročnost na 1 celosvětově vyrobenou kWh, ze které byl následně podle počtu ujetých kilometrů stanoven průměr celkového množství CO₂ vyprodukovaného nabíjením během celé životnosti elektromobilu.

Tab. 19: Přehled hodnot národního energetického mixu ČR a celosvětový průměr pro rok 2022 [66, 67, 68]

| Zdroje energie | Průměr ČR [%] | Celoevropský průměr [%] | Celosvětový průměr [%] |
|--------------------|---------------|-------------------------|------------------------|
| Obnovitelné zdroje | 5,46 | 9,22 | 29,55 |
| Fosilní zdroje | 53,60 | 73,76 | 61,27 |
| Jaderné zdroje | 40,95 | 17,02 | 9,18 |

Pro výpočet emisní náročnosti na výrobu 1 kWh byl použit celosvětový průměr energetického mixu z Tab. 19. Vypočtené vážené průměry CO_{2ekv} na výrobu 1 kWh reflektují proporčnost daného energetického mixu a stejně jako součet těchto průměrů (469,51 g CO_{2ekv}, viz Tab. 20) odpovídají ekvivalentu oxidu uhličitého (hodnoty pro CO₂ a jiných skleníkových emisí se stejným účinkem na prostředí). Z Tab. 20 je zároveň patrné, že pro nabíjení elektromobilu je klíčové, jaký zdroj energie byl pro výrobu elektřiny použit.

Tab. 20: Přehled emisí CO_{2ekv} vznikající výrobou 1 kWh [66, 68]

| Zdroje energie | Celosvětový průměr [%] | Emise CO _{2ekv} na výrobu 1 kWh [g] | Vážený průměr CO _{2ekv} na výrobu 1 kWh [g] |
|--------------------|------------------------|--|--|
| Obnovitelné zdroje | 29,55 | 24,3 | 7,1785 |
| Fosilní zdroje | 61,27 | 750,0 | 460,7250 |
| Jaderné zdroje | 9,18 | 17,5 | 1,6065 |
| Σ | | | 469,51 |

Tab. 21: Porovnání spotřeby energie elektromobilů podle standardu WLTP [76]

| Model | Spotřeba energie podle WLTP [kWh/100 km] |
|--|--|
| Hyundai Ioniq Elektro Style | 13,8 |
| VW 20e-up 20Style | 14,5 |
| Seat Mii Electric Plus | 14,9 |
| Mini Cooper SE | 16,8 |
| BMW i3 (120 Ah) | 15,3 |
| Kia e-Niro Spirit (64 kWh) | 15,9 |
| Smart Forfour EQ passion | 15,9 |
| Peugeot e-2008 GT | 17,6 |
| Kia e-Soul (64 kWh) Spirit | 15,7 |
| Renault Zoe R135 Z.E. 50 Intens (52 kWh) | 17,7 |
| VW ID.3 Pro Performance 1st Max | 16,1 |
| Hyundai Kona Elektro (64 kWh) Trend | 15,0 |

| Model | Spotřeba energie podle WLTP [kWh/100 km] |
|------------------------------------|---|
| Tesla Model 3 Standard Range Plus | 14,3 |
| Peugeot e-2008 GT | 17,8 |
| Tesla Model 3 Long Range AWD | 16,0 |
| Nissan Leaf Acenta (40 kWh) | 20,6 |
| Nissan Leaf e Tekna (62 kWh) | 18,5 |
| Porsche Taycan 4S Performance Plus | 26,2 |
| Audi e-tron Sportback 55 quattro | 23,7 |
| Audi e-tron 55 quattro | 23,0 |
| Jaguar i-Pace EV400 S AWD | 22,0 |
| Mercedes EQC 400 AMG Line | 22,6 |
| Nissan e-NV200 Evalia (40 kWh) | 25,9 |
| Průměrná hodnota | 18,3 |

Na základě dat v Tab. 21 byla vypočtena průměrná spotřeba elektřiny elektromobilu na 100 km včetně nabíjecí ztráty (18,3 kWh). Pro výpočet množství CO_{2ekv} v závislosti na najetých kilometrech byl použit součet vážených průměrů CO_{2ekv} vznikající při výrobě 1 kWh (469,51 g) a průměrná spotřeba energie na 100 km (18,3 kWh). Po ujetí 160 000 km vznikne výrobou elektřiny přibližně 13 747 kg CO_{2ekv} , po 280 000 km 24 058 kg CO_{2ekv} a po 500 000 km 42 960 kg CO_{2ekv} .

Tab. 22: Přehled emisí CO_{2ekv} vznikající výrobou elektřiny potřebné k nabíjení vozu

| Součet vážených průměrů CO_{2ekv} na výrobu 1 kWh [g] | Průměrná spotřeba energie na 100 km [kWh] | Množství CO_{2ekv} po ujetí 160 000 km [kg] | Množství CO_{2ekv} po ujetí 280 000 km [kg] | Množství CO_{2ekv} po ujetí 500 000 km [kg] |
|---|---|---|---|---|
| 469,51 | 18,3 | 13 747 | 24 058 | 42 960 |

4.2.3.3 Emise z údržby elektromobilů

Nejzásadnějšími oblastmi servisování jsou u elektromobilů pneumatiky a případná výměna samotné baterie, množství CO_2 , které vzniká servisováním a následný přepočet daného údaje na interval údržby je uveden v Tab. 23. [49]

V kapitole 4.2.3.1 bylo řečeno, jakým způsobem vznikají emise při brzdění během jízdy. Díky rekuperaci kinetické energie by při brzdění měly být brzdové destičky a kotouče méně zatěžovány, a tedy i méně často servisovány. Bohužel kvůli neexistenci relevantních

dat zabývající se touto problematikou a současně vzhledem k tomu, že automobily se spalovacím motorem mohou brzdit i motorem, nejsou brzdy coby servisovaná součást vozidla v Tab. 23 uvedeny.

Tab. 23: Přehled servisovaných součástí a jejich emisní zátěži [49]

| Servisovaná „část“ | Interval údržby [km] | Množství CO ₂ [kg/výměna] | Přepočtené množství CO ₂ [kg/km] |
|--------------------|----------------------|--------------------------------------|---|
| pneumatiky | 40 000 | 108 | 0,00270 |
| Li-ion baterie | 160 000 | 6 337 | 0,03961 |

Tab. 24: Přehled servisovaných součástí a jejich emisní zátěže během životního cyklu automobilu

| Servisovaná „část“ | Množství CO ₂ [kg/km] | Množství CO ₂ při ujetí 160 000 km [kg] | Množství CO ₂ při ujetí 280 000 km [kg] | Množství CO ₂ při ujetí 500 000 km [kg] |
|--------------------|----------------------------------|--|--|--|
| pneumatiky | 0,00270 | 432 | 756 | 1 350 |
| Li-ion baterie | 0,03961 | 0 | 6 337 | 19 011 |
| Σ | | 432 | 6 793 | 20 361 |

V Tab. 24 je uveden přepočet množství CO₂ podle ujetých km. Za konstelace životnosti baterie 160 000 km (tzn. po 160 000 ujetých km se musí baterie vyměnit za novou), vznikne servisem elektromobilu 432 kg oxidu uhličitého (bude-li uvažováno, že nedojde k výměně baterie, ale automobil bude vyřazen). Při ujetí 280 000 km, kdy je uvažováno, že bude baterie měněna jednou, vznikne celkově 6 793 kg CO₂ a při ujetí 500 000 km (baterie bude měněna třikrát) se celkově vyprodukuje 20 361 kg CO₂.

V Tab. 25 byla jako komparativní hodnota množství emisí CO₂ použita vypočtená hodnota na výrobu 1 baterie o kapacitě 67,2 kWh (9 753 kg, viz Tab. 18). Přepočet zaznamenaný v Tab. 26 byl proveden stejným postupem jako v Tab. 23 a 24. Hodnoty pro údržbu pneumatik zůstávají neměnné.

Tab. 25: Přehled servisovaných součástí a jejich emisní zátěži

| Servisovaná „část“ | Interval údržby [km] | Množství CO ₂ [kg/výměna] | Množství CO ₂ [kg/km] |
|--------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| pneumatiky | 40 000 | 108* | 0,0027 |
| Li-ion baterie | 160 000 | 9 753** | 0,0609 |

*Převzatá hodnota z japonské studie. [49]

**Vypočtená hodnota (viz Tab. 18).

Tab. 26: Přehled servisovaných součástí a jejich emisní zátěže během životního cyklu automobilu

| Servisovaná „část“ | Množství CO ₂ [kg/km] | Množství CO ₂ při ujetí 160 000 km [kg] | Množství CO ₂ při ujetí 280 000 km [kg] | Množství CO ₂ při ujetí 500 000 km [kg] |
|--------------------|----------------------------------|--|--|--|
| pneumatiky | 0,0027 | 432 | 756 | 1 350 |
| Li-ion baterie | 0,0609 | 0 | 9 753 | 29 259 |
| Σ | | 432 | 10 209 | 30 609 |

Bylo vypočteno, že při ujetí 160 000 km vzniká údržbou 432 kg CO₂, při ujetí 280 000 km se servisováním vyprodukuje 10 209 kg CO₂ a při ujetí 500 000 km 30 609 kg CO₂.

Hodnoty japonské studie a hodnoty vypočtené v této práci byly následně zprůměrovány (Tab. 27). Z tabulky vyplývá, že pokud by elektromobil ujel za celý svůj životní cyklus 280 000 km, údržbou baterie by se vyprodukovalo 8 045 kg CO₂. Z této hodnoty je současně patrné, jaké množství emisí by se ušetřilo při prodloužení životnosti baterie. Pokud by se tedy u akumulátorů elektromobilů v budoucnu změnila jejich technologie a vydržely by vícero cyklů nabití tak, aby například vozidlo ujelo bez problémů až 500 000 km s původní baterií, tak by se namísto vypočtených 24 135 kg CO₂ nevyprodukoval žádný CO₂.

Tab. 27: Přehled průměrné emisní zátěže výměnou baterie během životního cyklu automobilu

| Emisní zatížení při výměně Li-ion baterie | Množství CO ₂ [kg/km] | Množství CO ₂ po ujetí 160 000 km [kg] | Množství CO ₂ po ujetí 280 000 km [kg] | Množství CO ₂ po ujetí 500 000 km [kg] |
|---|----------------------------------|---|---|---|
| podle studie [49] | 0,0609 | 0 | 9 753 | 29 259 |
| vypočtená hodnota (viz Tab. 18) | 0,0396 | 0 | 6 337 | 19 011 |
| Průměrná hodnota | | 0 | 8 045 | 24 135 |

4.2.4 Emise z likvidace a recyklace elektromobilů včetně baterií

Likvidace elektromobilů a vozidel se spalovacím motorem je podobná, proto vzniká i přibližně stejné množství emisí (tj. 66 kg oxidu uhličitého, viz kapitola 4.1.4). Jediným rozdílem je nakládání s akumulátory, jejichž likvidace je složitější, a to zejména proto, že lithium je vysoce hořlavé a toxické pro životní prostředí, proto ho není možné skládkovat. Současně zatím nevznikají studie, které by se zabývaly množstvím vzniklých emisí během jejich likvidace, a to ze tří důvodů:

- 1) velké množství baterií se recykluje,
- 2) pokud se baterie nerecykluje, tak nachází využití jinde,
- 3) velká část aut je zatím stále v provozu, proto není likvidace akumulátorů zatím příliš popsána.

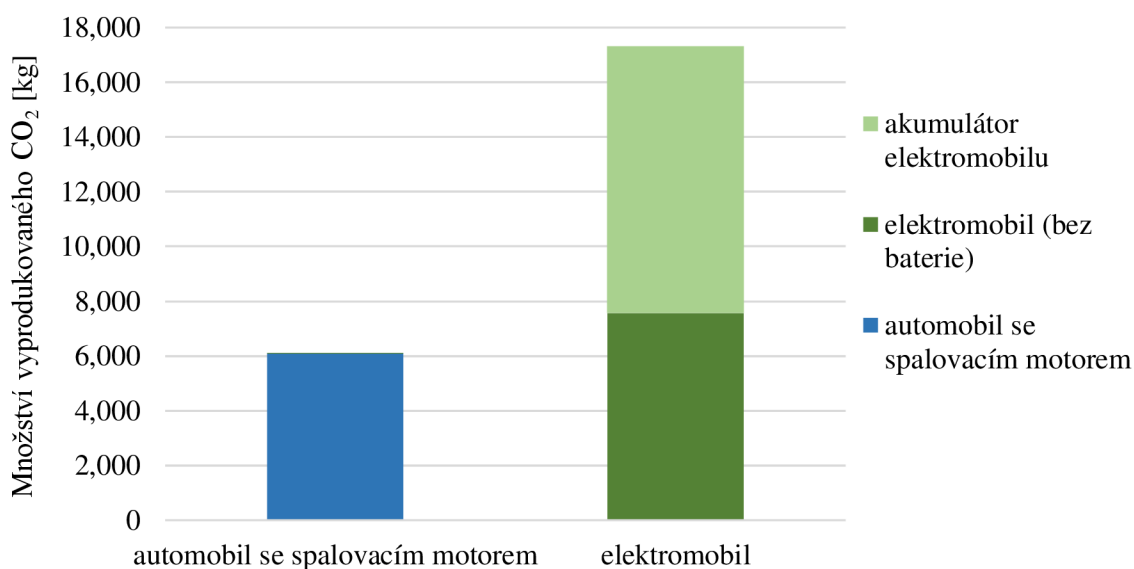
Na konci životního cyklu elektromobilu je v akumulátorech stále energie, která může být využita, bývají proto použity například pro skladování energie, v Japonsku napomáhají vyřazené baterie z elektromobilů Nissan Leaf zajišťovat stabilitu elektrické sítě pro veřejné osvětlení či baterie z Toyoty Camra slouží jako úložiště energie ze solárních panelů v národním parku Yellowstone. [77]

Z pohledu recyklace není proces v současné době ekonomický (je mnohem levnější těžit než recyklovat), ani zvláště ekologický, opětovné použití akumulátorů je však důležité pro snížení emisí CO₂, které vznikají při výrobě nových baterií. Během nejpoužívanější metody recyklace, a to pyrometalurgie, vzniká přibližně 5,11 kg CO_{2ekv} na 1 kWh. Recyklací průměrné baterie o kapacitě 67,2 kWh se tedy vyprodukuje až 344,4 kg CO_{2ekv}. Metodou méně používané hydrometalurgické recyklace vzniká 2,68 kg CO_{2ekv} na 1 kWh, což je o 47,6 % méně než v případě recyklace za využití pyrometalurgie - stále je to však jen zlomek toho, kolik CO₂ se vyprodukuje při výrobě zcela nové baterie. [78]

5 Výsledky

5.1 Emise z výroby vozidel

Výsledky výpočtů emisí z výroby jednoho automobilu jsou graficky zaznamenány na Obr. 9. Z obrázku je patrné, že výrobou elektromobilu (bez akumulátoru) vzniká podobné množství CO₂ jako při výrobě automobilu se spalovacím motorem. Velký rozdíl je však zaznamenán při započtení CO₂, který vzniká výrobou baterie elektromobilu. V takovém případě je patrné, že výrobou elektromobilu (včetně baterie) se vyprodukuje zhruba třikrát více emisí než při výrobě automobilu se spalovacím motorem. Bylo tudíž potvrzeno, že u výroby elektromobilu je z pohledu emisí zásadní, jakým způsobem se vyrobí jeho akumulátor.

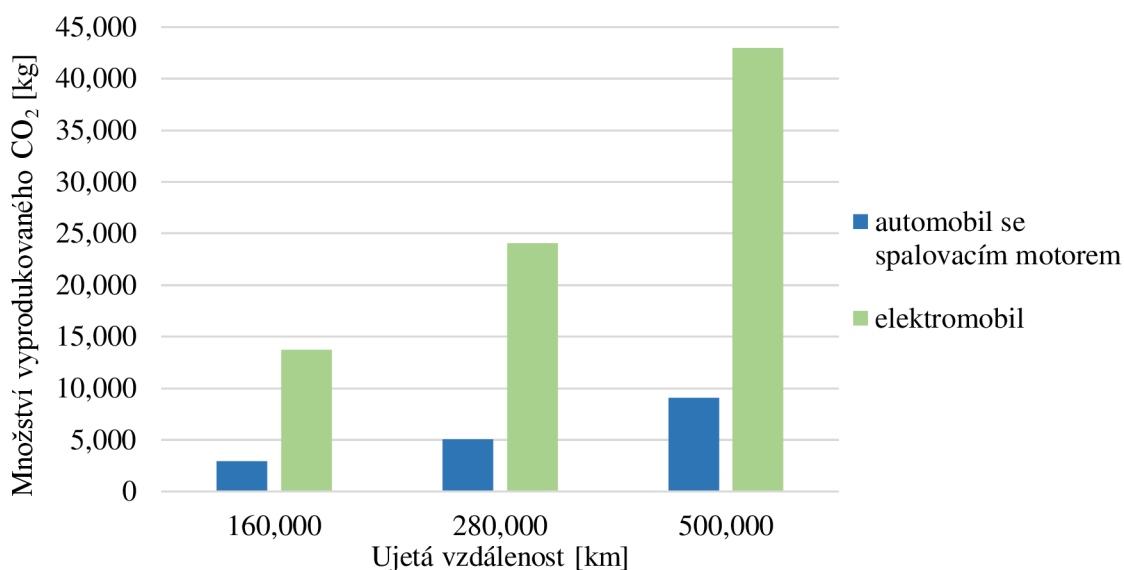


Obr. 9: Emise vznikající při výrobě jednoho vozidla

5.2 Emise z provozu vozidel

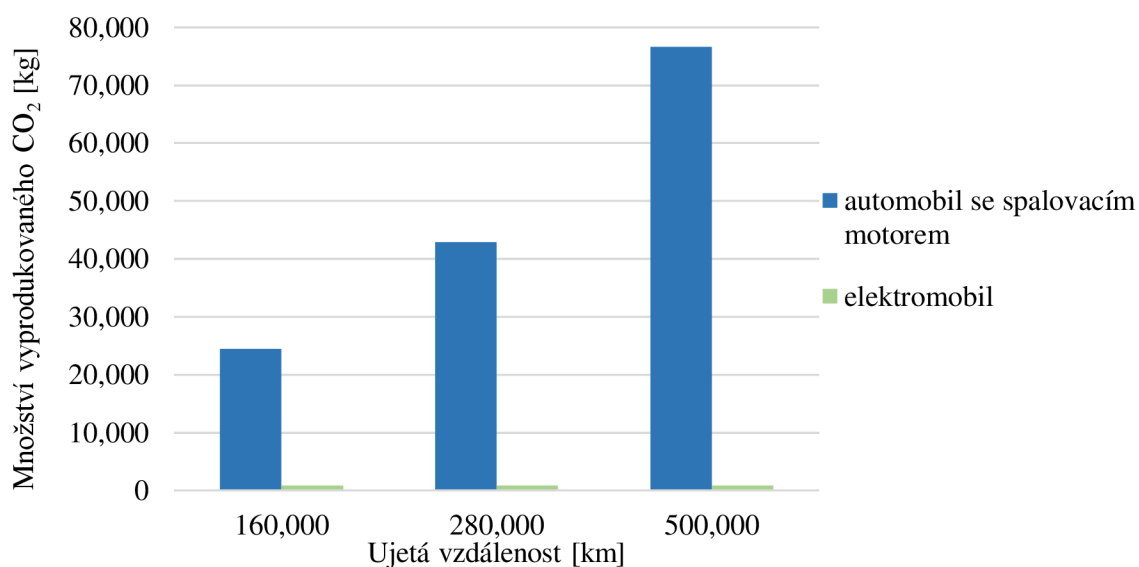
Vypočtené množství emisí, které vzniká výrobou paliva a elektrické energie k pohonu automobilů, je graficky znázorněno na Obr. 10, kde je patrné, že na jeden ujetý kilometr vyprodukuje automobil se spalovacím motorem až pětkrát více CO₂ než automobil s elektromotorem. Při uvažovaném životním cyklu 280 000 najetých km vyprodukuje konvenční automobil o 18 979 kg oxidu uhličitého více než elektromobil, pro cyklus 500 000 km je rozdíl dokonce 33 890 kg CO₂. Zároveň je nutné dodat, že energetický mix

daného regionu ovlivňuje množství CO₂, které se výrobou elektřiny vyprodukuje - zcela odlišné hodnoty budou například pro elektromobily v Norsku a Indii.



Obr. 10: Emise vznikající při výrobě paliva/elektřiny

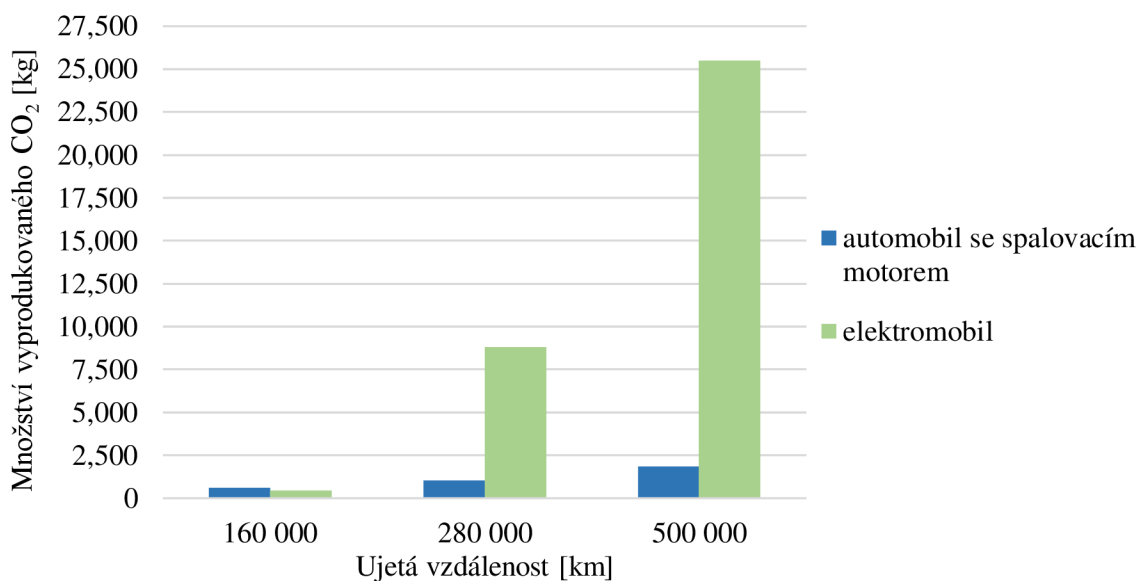
Na Obr. 11 je znázorněno porovnání emisí vznikajících během samotné jízdy. Elektromobily sice během jízdy neprodukují žádné emise, a proto výrobci používají termín „bezemisní automobily“, ovšem emise vznikají při výrobě elektrické energie potřebné pro nabití elektromobilu (tyto emise jsou znázorněny na Obr. 10). Naopak automobily se spalovacími motory jsou během svého provozu silně neekologické – ujetím 160 000 km vzniká přibližně 24 509 kg CO₂, což je téměř čtyřikrát více než výrobou automobilu.



Obr. 11: Emise vznikající při provozu vozidla (během jízdy)

5.3 Emise z údržby vozidel

Na základě dosažených výsledků bylo pozorováno, že automobily se spalovacím motorem jsou při údržbě ekologičtější. Údržba elektromobilu je náročná především kvůli akumulátoru, který vydrží pouze určitý počet cyklů nabití, poté je jeho kapacita nedostatečná pro běžný provoz, a je tudíž nutné jej vyměnit. V daný moment vzniká servisem skokově velké množství emisí. Při uvažovaném životním cyklu 160 000 km vyprodukují oba typy vozů podobné množství emisí, a to především kvůli absenci výměny nového akumulátoru. Při uvažování delšího cyklu (280 000 km) je již nutné baterii elektromobilu vyměnit, z toho důvodu je i na Obr. 12 patrný nárůst emisí. Pokud by měl jeden elektromobil ujet 500 000 km, musela by se běžná baterie vyměnit třikrát, v takovém případě by servisováním vozu vzniklo 25 485 kg CO₂. U automobilu se spalovacím motorem je množství vyprodukovaných emisí relativně nízké, tj. na ujetých 160 000 km se vyprodukuje přibližně 432 kg CO₂ a po ujetí maximální uvažované vzdálenosti (500 000 km) vznikne 1 837 kg, tzn. o 93 % méně než u elektromobilu.



Obr. 12: Emise vznikající při údržbě vozidla

5.4 Emise z likvidace a recyklace

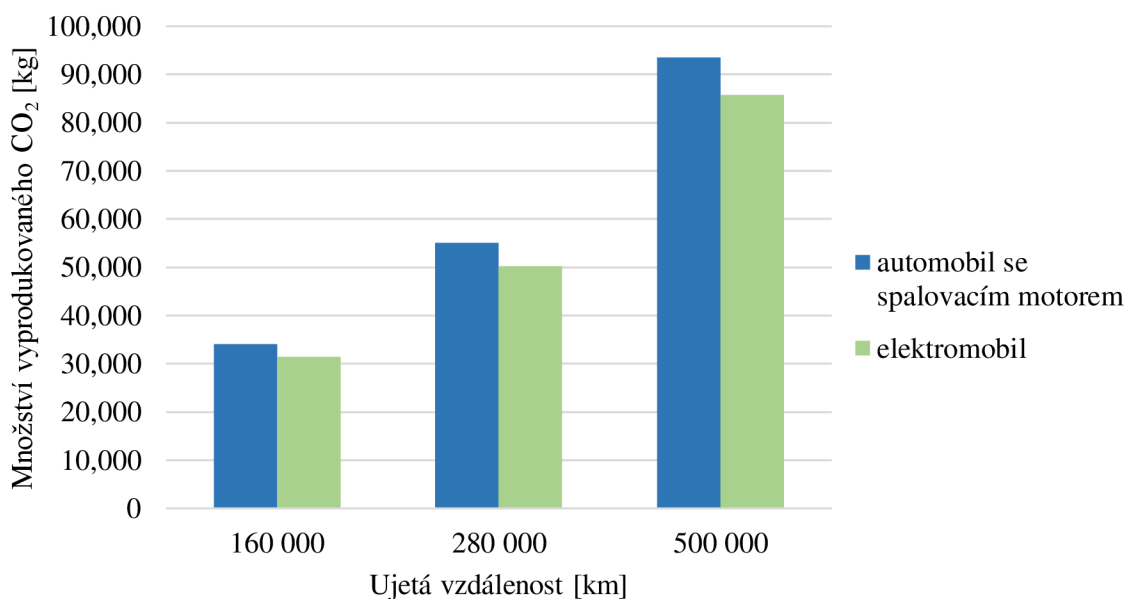
Výsledné množství emisí vznikající likvidací automobilu (převážně elektromobilu) není zcela průkazné, protože jak již bylo řečeno v kapitolách dané problematiky, neexistuje dostatek relevantních studií zabývajících se vznikem emisí (nejen CO₂) během tohoto finálního procesu na konci životnosti vozidla. Hodnoty, které byly zaznamenány

v kapitolách, jsou velmi nízké, a navíc podobné pro oba vozy, proto nemohou ovlivnit výslednou bilanci emisí (podíl emisí vzniklých likvidací konvenčního automobilu tvoří při cyklu 280 000 najetých km přibližně 0,11 % celkové produkce emisí). Z výše uvedených důvodů nebyly emise vznikající touto fází zahrnuty do celkové bilance emisí elektromobilu a automobilu se spalovacím motorem.

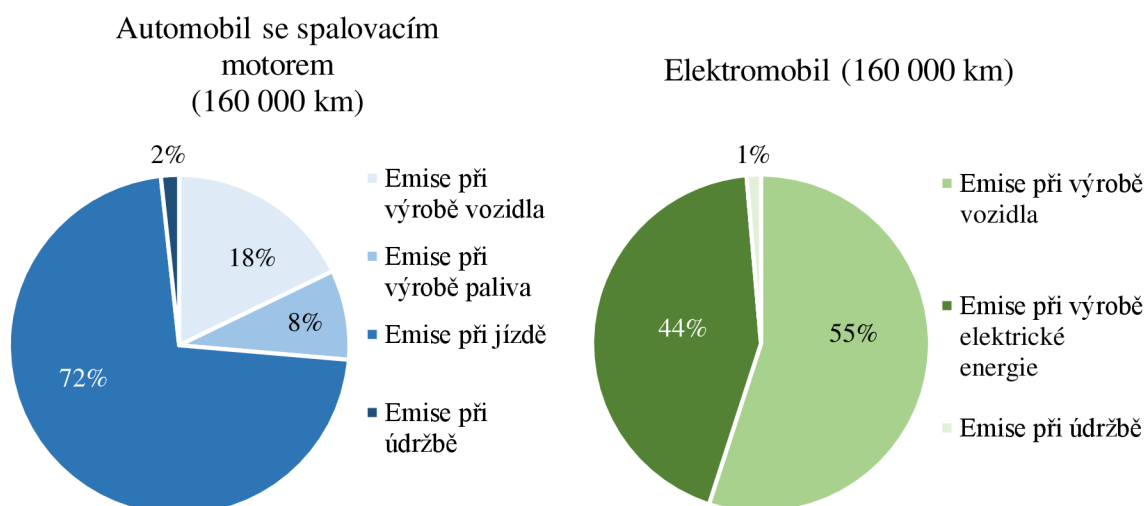
5.5 Komparace emisí z elektromobilů a automobilů se spalovacím motorem

Pro celkovou komparaci bylo sečteno množství CO₂ vznikající v jednotlivých fázích životního cyklu vozidla. V případě automobilů se spalovacím motorem byl proveden součet emisí z výroby samotného automobilu, z výroby paliva, z provozu (ze spalování paliva a z brzd a pneumatik) a z údržby vozu. Pro výpočet celkově vyprodukovaného CO₂ u elektromobilů byly sečteno množství z výroby samotného elektromobilu včetně výroby baterie, z provozu (z brzd, pneumatik a z výroby elektřiny na nabíjení) a z údržby elektromobilu.

Z Obr. 13 je patrné, že celkové množství vyprodukovaného CO₂ se pro automobily se spalovacím motorem a elektromotorem příliš neliší (přibližně o 10 %). Při ujetí 160 000 km vyprodukuje konvenční automobil o 2 582 kg CO₂ více než elektromobil (tj. o 9,7 % více), v případě 280 000 najetých km vyprodukuje automobil se spalovacím motorem o 4 898 kg více a pokud oba automobily ujedou 500 000 km, tak vyprodukuje konvenční automobil o 7 810 kg CO₂ více než elektromobil.

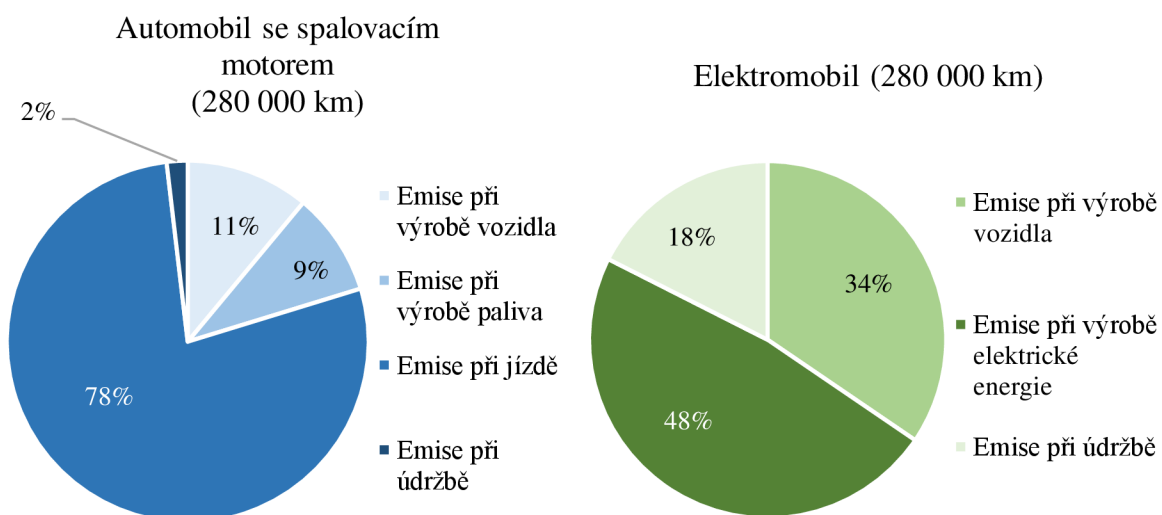


Obr. 13: Celkové množství vyprodukovaných emisí



Obr. 14: Porovnání emisí na ujetých 160 000 km

Na Obr. 14 je znázorněno procentuální rozdělení emisí během jednotlivých životních cyklů obou typů automobilů. Pro automobil se spalovacím motorem, který ujede 160 000 km, se většina vzniklého CO₂ vyprodukuje během jízdy (72 %), u elektromobilu jsou zásadní emise vzniklé při výrobě vozidla (55 %) a taktéž emise vyprodukované výrobou paliva (44 %). Při pravidelné údržbě vyprodukují oba typy automobilů minimum emisí, v rámci celkového množství je tato fáze zastoupena jen 1 resp. 2 %.

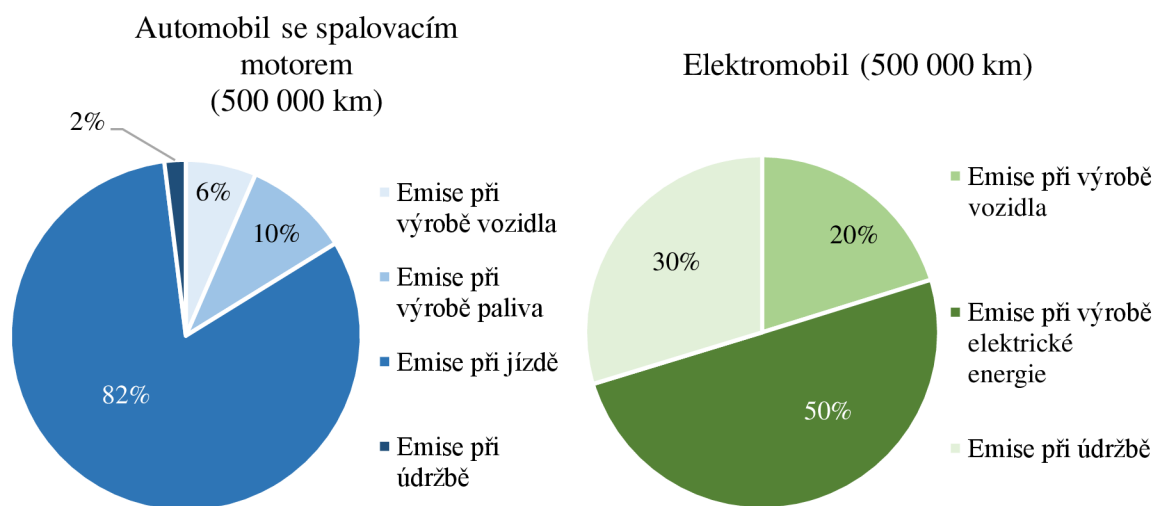


Obr. 15: Porovnání emisí na ujetých 280 000 km

Na Obr. 15 je znázorněno procentuální rozdělení fází, při kterých je produkován CO₂, po ujetí 280 000 km. U automobilu se spalovacím motorem se poměr změnil pouze nepatrně - emise vyprodukované během jízdy tvoří 78 % veškerých vzniklých emisí, zbylých 22 % tvoří emise z výroby automobilu, paliva a z údržby vozu. Znatelná změna je však patrná u elektromobilu, pro který již nejsou z pohledu emisí dominantní pouze emise při výrobě vozidla (34 %) a emise při výrobě elektřiny na nabíjení akumulátoru (48 %), ale také emise vznikající údržbou (18 %) - tento nárůst je zapříčiněn výměnou celé baterie.

Z Obr. 16 je patrné, že při ujetí 500 000 km se u auta se spalovacím motorem zvětšil poměr vyprodukovaného CO₂ během jízdy (82 %) vůči zbylým fázím, naopak u elektromobilu dochází ke snižování rozdílů mezi jednotlivými fázemi - 50 % tvoří emise vzniklé výrobou elektřiny, 30 % servis (včetně výroby nové baterie) a 20 % samotná výroba vozu (včetně původní baterie).

Na základě dosažených dat byl tedy pozorován trend, tj. při zvyšujícím se počtu kilometrů se u automobilu se spalovacím motorem stávají dominantní položkou emise vzniklé jízdou (emise vyprodukované během samotné jízdy a emise vzniklé výrobou paliva), při ujetí nad 500 000 km by tato oblast tvořila ještě více než 82 %.



Obr. 16: Porovnání emisí na ujetých 500 000 km

6 Závěr

V rámci této diplomové práce byla vytvořena bilance celkového emisního zatížení automobilů se spalovacím motorem a elektromotorem. V případě konvenčních vozů se spalovacími motory, které v rámci svých životních cyklů vyprodukují nejvíce CO₂ během samotné jízdy (76 585 kg CO₂ při ujetí 500 000 km), závisí jejich budoucnost na tom, jak se budou nadále vylepšovat systémy snižující tvorbu výfukových emisí. U těchto vozidel by zároveň bylo vhodné upravit celý proces výroby paliva, jelikož v současné době není proces nikterak ekologický. Výrobou paliva na 500 000 ujetých km vzniká přibližně 9 071 kg CO₂, což tvoří přibližně 10 % celkového množství emisí, které automobil se spalovacím motorem během dané vzdálenosti vyprodukuje.

V případě elektromobilů tkví řešení problematiky emisí v prodloužení životnosti samotného akumulátoru, který je zodpovědný za velkou část vzniklých emisí. Za konstelace současné životnosti baterie (160 000 ujetých km) bude muset být akumulátor během uvažovaného životního cyklu (500 000 km) třikrát měněn, čímž vznikne až 24 135 kg CO₂. Zároveň je u elektromobilů nutné se zaměřit na výrobu elektřiny, resp. je potřeba upravit energetický mix tak, aby se pro nabíjení minimálně využívala elektřina vyrobená v uhelných elektrárnách. Výrobou elektrické energie potřebné k nabíjení vozidla se vyprodukuje přibližně 42 960 kg CO₂ (po 500 000 ujetých km). Do budoucna je proto důležité co nejefektivněji využít přednosti elektromobilů, kterými jsou lokální nulové emise (tzn. jízdou nevznikají téměř žádné emise vyjma pevných částic z brzdění a pneumatik) a rozšířit elektromobilitu v zemědělském a stavebním průmyslu či ve službách (konkrétně dovozkových službách ve městech), v první řadě je však potřeba snížit množství CO₂, které vzniká výrobou akumulátorů a elektřiny.

Na základě celkové bilance bylo zjištěno, že automobil se spalovacím motorem vyprodukuje 93 573 kg CO₂ a elektromobil 85 763 kg CO₂ (při ujetí 500 000 km), automobil se spalovacím motorem tudíž vyprodukuje přibližně o 10 % více emisí. Elektromobily se obecně považují za ekologicky přijatelnější variantu vozidel, na základě porovnání však bylo zjištěno, že rozdíly mezi množstvím CO₂, které vyprodukují oba typy automobilů, nejsou v celkovém měřítku nikterak markantní, zvláště pak za situace, že nejsou z důvodu nedostatku dat zahrnuty emise vznikající při likvidaci akumulátorů.

Seznam použitých zdrojů

- [1] **ANENBERG, Susan C. a spol.** *Impacts and mitigation of excess diesel-related NO_x emissions in 11 major vehicle markets*, [online], 2017 [cit. 2023-9-20] Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/nature22086#citeas>
- [2] **BRINSON, Linda C. a Francisco Guzman.** *How Much Air Pollution Comes From Cars*, [online], 2021 [cit. 2023-9-20] Dostupné z: <https://auto.howstuffworks.com/air-pollution-from-cars.htm>
- [3] *Cars, Trucks, Buses and Air Pollution*, [online], 2023 [cit. 2023-9-20] Dostupné z: <https://www.ucsusa.org/resources/cars-trucks-buses-and-air-pollution>
- [4] **BARTH, Matthew a Boriboonsomsin Kanok.** *Traffic Congestion and Greenhouse Gases*, [online], ACCESS Magazine 2009 [cit. 2023-9-20] Dostupné z: <https://escholarship.org/content/qt3vz7t3db/qt3vz7t3db.pdf>
- [5] *CO₂ emissions from cars: facts and figures*, [online], 2023 [cit. 2023-9-20] Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics>
- [6] **DUSIL, Tomáš.** *Systém recirkulace spalin EGR: Strašák moderních motorů a všechny jeho závady*, [online], 2017 [cit. 2023-6-25] Dostupné z: <https://www.auto.cz/system-recirkulace-spalin-egr-strasak-modernich-motoru-a-vsechny-jeho-zavady-111938>
- [7] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Kjótský protokol k rámcové úmluvě organizace Spojených národů o změně klimatu*, [cit. 2023-6-25] Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kjotsky_protokol/\\$FILE/OMV-cesky_protokol-20081120.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kjotsky_protokol/$FILE/OMV-cesky_protokol-20081120.pdf)
- [8] *The Paris Agreement*, [online], UNFCCC [cit. 2023-6-25] Dostupné z: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [9] **BIEKER, Georg.** *A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars*, [online] Communications, 2021, [cit. 2023-6-3] Dostupné z: <https://www.team-bhp.com/forum/attachments/electric-cars/2310712d1653112667-things-consider-when-buying-electric-car-global-lca-passenger-cars-jul2021-0.pdf>
- [10] **SAJDL, Jan.** *Emisní norma EURO*, [online] Praha [cit. 2023-6-25] Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/emisni-norma-euro/>
- [11] EU. *CO₂ emission performance standards for cars and vans*, [online] EU [cit. 2023-6-25] Dostupné z: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en

- [12] **SHWETA, Singh a spol.** *An Overview of Vehicular Emission Standards*, [online] Metrology Society of India 2022, [cit. 2023-7-2] Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12647-022-00555-4>
- [13] EPA. *Transportation, Air Pollution, and Climate Change*, [online] EPA 20203, [cit. 2023-6-29] Dostupné z: <https://www.epa.gov/transportation-air-pollution-and-climate-change>
- [14] **MIKULSKI, Maciej a spol.** *Tyre pyrolytic oil fuel blends in a modern compression ignition engine: A comprehensive combustion and emissions analysis*, [online], 2023 [cit. 2023-6-29] 2022 Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236122007281>
- [15] **ZHANG, Phate.** *China's transition to new emission standard*, [online], 2023 [cit. 2023-6-25] Dostupné z: <https://cnevpost.com/2023/03/13/china-transition-to-new-emission-standard-affect-auto-market/>
- [16] **HROMÁDKO, Jan.** *Speciální spalovací motory a alternativní pohony*, Praha: Grada, 2012 [cit. 2023-5-30] ISBN 978-80-247-7079-6
- [17] **HROMÁDKO, Jan.** *Speciální spalovací motory*, Praha: Grada, 2011 [cit. 2023-5-30] ISBN 978-80-247-7478-7
- [18] **REMEK, Branko.** *Automobil a spalovací motor - Historický vývoj*, Praha: Grada, 2012 [cit. 2023-6-1] ISBN 978-80-247-7694-1
- [19] **PECHOUT, Martin.** *Spalovací motory – základní přehled*, [online] skripta 2019, [cit. 2023-6-4] Dostupné z: https://katedry.czu.cz/storage/258/7579_Skripta-Pechout-draft-8.pdf
- [20] **SAJDL, Jan.** *Studený start*, [online] Autolexicon [cit. 2023-6-4] Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/studený-start/>
- [21] **MAŠEK, František.** *Vše o palivech – kvalita nafty*, [online] 2014, [cit. 2023-7-4] Dostupné z: <https://www.tipcars.com/magazin/nase-tema/vse-o-palivech-kvalita-nafty-6-dil.html>
- [22] **VACULÍK, Martin.** *Co dovedou vysokooktanové benziny*, [online] Svět motorů [cit. 2023-7-2] Dostupné z: <https://www.lpg-obchod.cz/wp-content/uploads/2014/02/Benz%C3%ADny-Super-Plus-98-Megatest.pdf>
- [23] **ILHAN ILHAK, Mehmet a spol.** *Alternative Fuels for Internal Combustion Engines*, [online], univerzita Erciyes - Turecko, 2019 [cit. 2023-6-10] Dostupné z: <https://www.intechopen.com/chapters/66638>
- [24] **BOUČEK, Jan.** *Alternativní palivo LPG*, [online], Praha 2003 [cit. 2023-6-4] Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zelena-domacnost/rady-a-navody/alternativni-palivo-lpg>

- [25] **GÓRNIAK, Adam a spol.** *Advantages and disadvantages of using methane from cng in motor vehicles in polish conditions.* [online], 2018 [cit. 2023-7-7] Dostupné z: <https://sciendo.com/article/10.2478/mape-2018-0031>
- [26] **NANTHAGOPAL, Kasianantham a spol.** *Hydrogen enriched compressed natural gas – a futuristic fuel for internal combustion engines,* [online], VIT University - Indie 2011, [cit. 2023-7-7] Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/751a/bcacbb8cafb547e432d9aa15d96c2b176506.pdf>
- [27] **JAICHANDAR, Sheba a spol.** *The Status of Biodiesel as an Alternative Fuel for Diesel Engine,* [online], Journal of Sustainable Energy & Environm, 2011 [cit. 2023-6-10] Dostupné z: <https://www.jseejournal.com/media/89/attachment/The%20status%20of%20biodiesel%20pp.%2071-75.pdf>
- [28] **MISHRA, Pankaj.** *What is Two Stroke Engine and How it Works,* [online], [cit. 2023-6-4] Dostupné z: <https://www.mechanicalbooster.com/2015/09/two-stroke-engine.html>
- [29] **JONES, Sarah.** *If electric cars are the answer, what was the question,* [online], British Medical Bulletin 2019 [cit. 2023-29-9] Dostupné z: <https://academic.oup.com/bmb/article/129/1/13/5274656>
- [30] **HELMERS, Eckard a Marx Patrick.** *Electric cars: technical characteristics and environmental impacts,* [online], Environmental Sciences Europe 2012 [cit. 2023-9-29] Dostupné z: <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/2190-4715-24-14>
- [31] **KARCZEWSKI, Mirosław a spol.** *Analysis of electric vehicles efficiency And their influence on environmental pollution,* [online], Journal of KONES Powertrain and Transport 2019 [cit. 2023-9-29] e-ISSN: 2354-0133
- [32] **GAINES, Linda.** *EV batteries and recycling,* [online], LLC [cit. 2023-8-29] Dostupné z: https://www.anl.gov/sites/www/files/2022-12/EV_Batteries_Recycling_FINAL%2012-14-22.pdf
- [33] **BENEŠ, Petr.** *Obavy o životnost baterie elektromobilu jsou zbytečné,* [online], [cit. 2023-10-15] Dostupné z: <https://www.autonabijecka.cz/obavy-o-zivotnost-baterie-elektromobilu-jsou-zbytecne/>
- [34] Komatsu. *Rigid Dump Truck HD605-7,* [online], Komatsu, [cit. 2023-8-13] Dostupné z: <https://www.komatsu.eu/en/product-archive/rigid-dump-trucks/hd605-7>
- [35] **MAZAL, Mirek.** *Největší elektromobil světa je 123tunové monstrum, ani tak nikdy nepotřebuje nabít,* [online], 2019 [cit. 2023-8-13] Dostupné z: <https://www.autoforum.cz/fascinace/nejvetsi-elektromobil-sveta-je-123tunove-monstrum-ani-tak-nykdy-nepotrebuje-nabit/>

- [36] **BUREŠ, David.** *Největší flotila elektromobilů u nás se rýsuje. Rohlik.cz vsadí na elektrické dodávky z Číny*, [online], auto.cz [cit. 2023-8-23] Dostupné z: <https://www.auto.cz/nejvetsi-flotila-elektromobilu-u-nas-se-rysuje-rohlik-cz-vsadi-na-eletricke-dodavky-z-ciny-141717>
- [37] ROHLIK. *Ekologický rohlík*, [online], rohlik.cz [cit. 2023-8-23] Dostupné z: <https://www.rohlik.cz/tema/ekologicky-rohlik>
- [38] **KANTA, Anna.** *České firmy chtějí elektromobily ve vozovém parku. Jen je nemají kde nabíjet*, [online], CZECH NEWS CENTER [cit. 2023-8-23] Dostupné z: <https://www.e15.cz/byznys/doprava-a-logistika/ceske-firmy-chteji-elektromobily-ve-vozovem-parku-jen-je-nemaji-kde-nabijet-1390034>
- [39] WAYMO. *Waymo Driver*, [online], Waymo LLC [cit. 2023-8-29] Dostupné z: <https://waymo.com/waymo-driver/>
- [40] MONARCH. *Driving Farm Profitability and Planet Sustainability*, [online], MONARCH 2023 [cit. 2023-9-19] Dostupné z: <https://www.monarchtractor.com/>
- [41] **WOLF, Michael.** *Monarch Launches Production of Electric, Driver-Optional Tractor*, [online], THE SPOON 2022 [cit. 2023-9-19] Dostupné z: <https://thespoon.tech/monarch-launches-production-of-electric-driver-optional-tractor/>
- [42] **ARAMBARRI, James a spol.** *Lithium ion car batteries: Present analysis and future predictions*, [online], 2019 [cit. 2023-10-20] Dostupné z: <https://koreascience.kr/article/JAKO201909255110542.pdf>
- [43] **INDRAJIT, N. Yadav.** *AdBlue: An Overview*, [online], Indie 2011 [cit. 2023-10-21] Dostupné z: <https://ureaknowhow.com/wp-content/uploads/2014/09/2010-Yadav-AdBlue-an-Overview.pdf>
- [44] Cruise. *It's Earth Day - Here's Why Our Sustainability Commitment is Year-Round*, [online], 2022 Cruise LLC [cit. 2023-10-21] Dostupné z: <https://getcruise.com/news/blog/2022/its-earth-day-heres-why-our-sustainability-commitment-is-year-round/>
- [45] **CAMPBELL, Russell.** *Car pollution facts: from production to disposal, what impact do our cars have on the planet*, [online], Autovia [cit. 2023-11-11] Dostupné z: <https://www.autoexpress.co.uk/sustainability/358628/car-pollution-production-disposal-what-impact-do-our-cars-have-planet>
- [46] EPA. *Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle*, [online] EPA 2023, [cit. 2023-11-18] Dostupné z: <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>

- [47] **KAREL, Jan.** *Metodika pro výpočet emisí částic pocházejících z resuspenze ze silniční dopravy*, [online] CENEST 2015, [cit. 2023-11-18] Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/vestnik_mzp_2018/\\$FILE/SOTPR_Vestnik_listopad_2018_priloha14_181211.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/vestnik_mzp_2018/$FILE/SOTPR_Vestnik_listopad_2018_priloha14_181211.pdf)
- [48] **ANDRESSON, Jon a spol.** *Measurement of emissions From brake and tyre wear*, [online] Final Report – Phase 1, Ricardo Energy & Environment 2023, [cit. 2023-11-18] Dostupné z: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1161133/measurement-of-emissions-brake-and-tyre-wear.pdf
- [49] **KAWAMOTO, Ryuji a spol.** *Estimation of CO2 Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA*, [online] Sustainability 2019, [cit. 2023-11-18] Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/9/2690>
- [50] **MASNADI, Mohammad S. a spol.** *Global carbon intensity of crude oil production*, [online] POLICY FORUM 2018, č 361 vydání 6405, [cit. 2023-12-10] Dostupné z: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aar6859>
- [51] **TABUCHI, Hiroko a Brad Plumer.** *How Green Are Electric Vehicles*, [online] 2023, [cit. 2023-12-10] Dostupné z: <https://www.nytimes.com/2021/03/02/climate/electric-vehicles-environment.html>
- [52] **RACZ, Andrea Aurora.** *A Look into Electric/Hybrid Cars from an Ecological Perspective*, [online] ScienceDirect 2014, [cit. 2023-12-10] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017315000638>
- [53] **CHARVÁT, Hugo.** *Výroba, nebo spotřeba: čím zatěžuje automobil více*, [online] 2008, [cit. 2023-12-10] Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zelena-domacnost/zpravy-zd/vyroba-nebo-spotreba-cim-zatezuje-automobil-vice>
- [54] **SULLIVAN, Joseph a spol.** *Energy-Consumption and Carbon-Emission Analysis of Vehicle and Component Manufacturing*, [online] Argonne National Laboratory 2010, [cit. 2024-1-18] Dostupné z: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2010/10/68288.pdf>
- [55] *Sustainability report*, [online] Nissan motor corporation 2021, [cit. 2024-1-18] Dostupné z: https://www.nissan-global.com/EN/SUSTAINABILITY/LIBRARY/SR/2021/ASSETS/PDF/SR21_E_All.pdf
- [56] **DOKOUPIL, Michal.** *Jízda čistá, ale co výroba? Kolik CO2 vznikne při výrobě elektromobilů?* [online] Auto.cz, [cit. 2024-1-19] Dostupné z: <https://www.auto.cz/jizda-cista-ale-co-vyroba-kolik-co2-vznikne-pri-vyrobe-elektromobilu-131387>
- [57] **QIAO, Qinyu.** *Comparative Study on Life Cycle CO2 Emissions from the Production of Electric and Conventional Vehicles in China* [online] State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Beijing 2017, [cit. 2024-1-19] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217309049>

- [58] **JENKINS, Dan.** *LowCVP study demonstrates the increasing importance of measuring whole life carbon emissions to compare vehicle performance*, [online] 2011, [cit. 2024-1-19] Dostupné z: https://www.zemo.org.uk/assets/pressreleases/LowCVP_Lifecycle_Study_June2011.pdf
- [59] *Climate protection in production*, [online] mercedes-benz, [cit. 2024-1-19] Dostupné z: <https://sustainabilityreport.mercedes-benz.com/2022/environment/climate-protection/climate-protection-in-production.html>
- [60] **ZIYAD, Tariq Abdullah.** *Assessment of end-of-life vehicle recycling: Remanufacturing waste sheet steel into mesh sheet*, [online] PLOS ONE 2021, [cit. 2024-1-19] Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8651122/>
- [61] **SCHEYRE, Jonas.** *How Much CO2 Is Saved When an Aluminum Automobile Frame Is Used Instead of a Steel One*, [online] Sustamize 2023, [cit. 2024-1-19] Dostupné z: <https://www.sustamize.com/blog/how-much-co2-is-saved-when-an-aluminum-automobile-frame-is-used-instead-of-a-steel-one>
- [62] **LASSESSON, Henric.** *Energy consumptions and CO2 emissions resulting from different handling strategies of glass from end-of-life vehicles.*, [online] 2008, [cit. 2024-1-19] Dostupné z: <https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/7a10e33b-1fb8-477f-952b-c9000bff7324/content>
- [63] **KALLSTROM, Henry.** *Raw materials – the biggest cost driver in the auto industry*, [online] Market Realist 2015, [cit. 2024-1-19] Dostupné z: <https://marketrealist.com/2015/02/raw-materials-biggest-cost-driver-auto-industry/>
- [64] **OROUMIYEH, Farzan a Yifang Zhu.** *Brake and tire particles measured from on-road vehicles: Effects of vehicle mass and braking intensity*, [online] Atmospheric Environment 2021, [cit. 2024-1-20] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590162121000216>
- [65] **TY, Liu a spol.** *Brake wear induced PM10 emissions during the world harmonised light-duty vehicle test procedure-brake cycle*, [online] Journal of Cleaner Production 2022, [cit. 2024-1-20] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622018820#bib19>
- [66] *European Residual Mix*, [online] 2023, [cit. 2024-1-21] Dostupné z: <https://www.aib-net.org/facts/european-residual-mix>
- [67] **RITCHIE, Hannah a Pablo Rosado.** *Electricity Mix*, [online] 2024, [cit. 2024-1-21] Dostupné z: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>
- [68] **LÁZŇOVSKÝ, Matouš.** *Zásadní nedorozumění: řada Evropanů si myslí, že jádro produkuje CO₂* [online] Emovio 2022, [cit. 2024-1-21] Dostupné z: <https://emovio.cz/2022/03/24/zasadni-nedorozumeni-rada-evropanu-si-mysli-ze-jadro-produkuje-co2/>

- [69] *ImpactReport 2022*, [online] Tesla, [cit. 2024-1-21] Dostupné z: https://www.tesla.com/ns_videos/2022-tesla-impact-report-highlights.pdf
- [70] **CLANCY, Heather.** *How EV maker Rivian plans to halve the carbon footprint of its vehicles by 2030*, [online] 2024, [cit. 2024-1-21] Dostupné z: <https://www.greenbiz.com/article/how-ev-maker-rivian-plans-halve-carbon-footprint-its-vehicles-2030>
- [71] *Q4 2022 Rivian Shareholder Letter* [online] Rivian 2022, [cit. 2024-1-21] Dostupné z: https://assets.rivian.com/2md5qhoeajym/5TBOuPTvDNZwGjUte1Vp1M/d789f042ab663f6766491f028ef8378f/Rivian_Q4-2022_Shareholder_Letter.pdf
- [72] **CORBY, Stephen.** *Who builds batteries for electric cars? EV battery manufacturers explained*, [online] Carsguide 2023, [cit. 2024-1-23] Dostupné z: <https://www.carsguide.com.au/ev/advice/who-builds-batteries-for-electric-cars-ev-battery-manufacturers-explained-83190>
- [73] **VENDITTI, Bruno.** *The Top 10 EV Battery Manufacturers in 2022*, [online] 2022, [cit. 2024-1-23] Dostupné z: <https://www.visualcapitalist.com/the-top-10-ev-battery-manufacturers-in-2022/>
- [74] **HIRZ, Mario a Thu Trang Nguy.** *Life-Cycle CO₂-Equivalent Emissions of Cars Driven by Conventional and Electric Propulsion Systems*, [online] Institute of Automotive Engineering 2022 [cit. 2024-1-30] Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2032-6653/13/4/61>
- [75] **VYHŇÁK, Martin.** *Žebříček najetých kilometrů*, [online] [cit. 2024-1-21] Dostupné z: https://www.ceskybenzin.cz/zobrazit_prumerne_spotreby.php
- [76] **NOVOTNÝ, Robin.** *Německý ADAC měřil reálnou spotřebu elektromobilů. Jak to dopadlo*, [online] Fdrive 2021, [cit. 2024-1-21] Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/nemecky-adac-meril-realnou-spotrebu-elektromobilu-6386>
- [77] **STROCH, Daniel.** *Kam chodí odpočívát... baterie z elektromobilů*, [online] E-ON 2021, [cit. 2024-2-3] Dostupné z: <https://www.eon.cz/byznys-energie/kam-chodi-odpocivat-baterie-z-elektromobilu/>
- [78] **GOPAL, Suchi.** *Recycling of Lithium Batteries and GHG Emissions*, [online] 2023, [cit. 2024-2-3] Dostupné z: <https://floodlightinvest.com/recycling-of-lithium-batteries-and-ghg-emissions/>
- [79] **TANG, Bowen a spol.** *Life Cycle Assessment of Battery Electric and Internal Combustion Engine Vehicles Considering the Impact of Electricity Generation Mix: A Case Study in China*, [online] Atmosphere 2022, 13, 252, [cit. 2024-2-5] Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/2/252>

Seznam použitých obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1: Porovnání vývoje emisí v Evropské Unii mezi lety 1900 - 2019 v jednotlivých sektorech [5] | 4 |
| Obr. 2: Emise skleníkových plynů během životního cyklu vozidel [9]..... | 6 |
| Obr. 3: Znázornění úspěšného snížení emisí dusíkatých oxidů v USA od roku 1975 [13]... | 9 |
| Obr. 4: Schéma pracovního cyklu čtyřdobého zážehového motoru [19] | 13 |
| Obr. 5: Schéma pracovního cyklu dvoudobého motoru [28]..... | 14 |
| Obr. 6: Zjednodušené schéma elektromobilu [30]..... | 17 |
| Obr. 7: Lithium-iontový akumulátor [32]..... | 18 |
| Obr. 8: EDumper Komatsu HD 605-7 [34] | 23 |
| Obr. 9: Emise vznikající při výrobě jednoho vozidla | 44 |
| Obr. 10: Emise vznikající při výrobě paliva/elektřiny | 45 |
| Obr. 11: Emise vznikající při provozu vozidla (během jízdy)..... | 45 |
| Obr. 12: Emise vznikající při údržbě vozidla | 46 |
| Obr. 13: Celkové množství vyprodukovaných emisí..... | 47 |
| Obr. 14: Porovnání emisí na ujetých 160 000 km | 48 |
| Obr. 15: Porovnání emisí na ujetých 280 000 km | 48 |
| Obr. 16: Porovnání emisí na ujetých 500 000 km | 49 |

Seznam použitých tabulek

| | |
|---|----|
| Tab. 1: Přehled emisních norem Euro a konkrétních emisních limitů pro osobní automobily [10]..... | 7 |
| Tab. 2: Přehled emisních norem Tier 4 [14]..... | 8 |
| Tab. 3: Přehled emisí vznikajících při výrobě automobilu se spalovacím motorem [53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 74] | 28 |
| Tab. 4: Množství emisí vznikajících při výrobě a přepravě benzínu a nafty [50] | 29 |
| Tab. 5: Množství CO ₂ vznikajícího při výrobě paliva během životního cyklu auta při ujetí 160 000 km | 29 |
| Tab. 6: Množství CO ₂ vznikajícího při výrobě paliva během životního cyklu auta při ujetí 280 000 km | 29 |
| Tab. 7: Množství CO ₂ vznikajícího při výrobě paliva během životního cyklu auta při ujetí 500 000 km | 29 |
| Tab. 8: Přehled vybraných automobilů se zážehovým motorem a jejich spotřeba benzínu [75]..... | 30 |
| Tab. 9: Přehled vybraných automobilů se vznětovým motorem a jejich spotřeba nafty [75] | 31 |
| Tab. 10: Množství vyprodukovaného CO ₂ podle spotřeby automobilu | 31 |
| Tab. 11: Přehled emisí oxidu uhličitého v závislosti na ujeté vzdálenosti | 32 |
| Tab. 12: Přehled servisovaných součástí a jejich průměrné emisní zátěže [49]..... | 33 |
| Tab. 13: Přehled servisovaných součástí a jejich průměrné emisní zátěže | 33 |
| Tab. 14: Množství CO ₂ vznikající při likvidaci vozu po konci životnosti [49] | 34 |
| Tab. 15: Množství CO ₂ , které nevzniká díky recyklaci vozidel [60, 61, 62, 63] | 34 |
| Tab. 16: Přehled vyprodukovaného CO ₂ při výrobě elektromobilu bez baterie. [54, 56, 57, 58, 69, 70, 71, 74, 79] | 36 |
| Tab. 17: Přehled množství CO ₂ vyprodukovaného při výrobě 1 kWh baterie ve významných regionech [56]..... | 37 |
| Tab. 18: Přehled množství CO ₂ vyprodukovaného při výrobě baterie elektromobilu [49, 56] | 37 |
| Tab. 19: Přehled hodnot národního energetického mixu ČR a celosvětový průměr pro rok 2022 [66, 67, 68]..... | 39 |
| Tab. 20: Přehled emisí CO _{2ekv} vznikající výrobou 1 kWh [66, 68]..... | 39 |

| | |
|--|----|
| Tab. 21: Porovnání spotřeby energie elektromobilů podle standardu WLTP [76]..... | 39 |
| Tab. 22: Přehled emisí CO _{2ekv} vznikající výrobou elektřiny potřebné k nabíjení vozu | 40 |
| Tab. 23: Přehled servisovaných součástí a jejich emisní zátěži [49]..... | 41 |
| Tab. 24: Přehled servisovaných součástí a jejich emisní zátěže během životního cyklu automobilu | 41 |
| Tab. 25: Přehled servisovaných součástí a jejich emisní zátěži | 41 |
| Tab. 26: Přehled servisovaných součástí a jejich emisní zátěže během životního cyklu automobilu | 42 |
| Tab. 27: Přehled průměrné emisní zátěže výměnou baterie během životního cyklu automobilu | 42 |