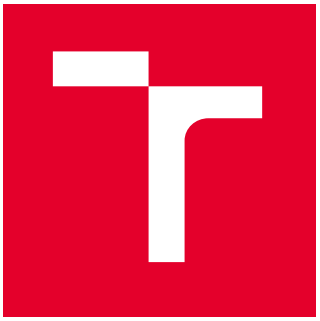


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

METODY POSUZOVÁNÍ ŽIVOTNÍHO CYKLU AKUMULÁTORŮ PRO BEV A PHEV VOZIDLA

LIFE CYCLE ASSESSMENT METHODS FOR BEV AND PHEV BATTERIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Matouš Dvořák**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **doc. Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2024

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	**Bc. Matouš Dvořák**
Studijní program:	Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.**
Akademický rok:	2023/24

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

Metody posuzování životního cyklu akumulátorů pro BEV a PHEV vozidla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výroba akumulátorů pro BEV a PHEV vozidla vyžaduje celu řadu materiálů a kovů, jejichž těžba a zpracování zatěžuje životní prostředí. Otázkou je také možnost recyklace materiálů po skončení životnosti akumulátorů a jejich další využití. V posledních letech se začínají rozvíjet metody pro posuzování životního cyklu výrobku (metody LCA), přičemž ale kvalita jejich výstupů a predikce je silně závislá na kvalitě vstupních dat. Tato DP práce je tedy zaměřena na sběr a utřídění dat dostupných v době vzniku práce v oblasti materiálového složení a náročnosti výroby akumulátorů pro BEV a PHEV vozidla.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je shromáždit podrobné informace ohledně materiálového složení a energetické náročnosti výroby akumulátorů pro bateriová a plug–in vozidla a metod pro odhad množství emisí, které se při této výrobě uvolní. Cílem je postihnout akumulátory s různými konstrukcemi a chemickým složením elektrod. Dále utříbení dat do podoby vhodné pro postupy LCA – life cycle assessment – posuzování životního cyklu výrobku a rámcově posoudit dopady výroby akumulátorů na životní prostředí.

Seznam doporučené literatury:

HIRZ, Mario; BRUNNER, Helmut a NGUYEN, Thu Trang. Greenhouse Gas Emissions of Electric Cars. Online. Tehnički glasnik. 2022, roč. 16, č. 2, s. 280-287. ISSN 18485588. Dostupné z: https://doi.org/10.31803/tg-20220407135956. [cit. 2023-10-19].

HIRZ, Mario a NGUYEN, Thu Trang. Life-Cycle CO2-Equivalent Emissions of Cars Driven by Conventional and Electric Propulsion Systems. Online. World Electric Vehicle Journal. 2022, roč. 13, č. 4. ISSN 2032-6653. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/wevj13040061. [cit. 2023-10-19].

DAI, Qiang; KELLY, Jarod C.; GAINES, Linda a WANG, Michael. Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. Online. Batteries. 2019, roč. 5, č. 2. ISSN 2313-0105. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/batteries5020048. [cit. 2023-10-19].

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Elektromobilita je aktuální téma a cesta, jak snížit uhlíkovou stopu nejen v osobní dopravě. Provoz elektromobilu však nemá oproti automobilům se spalovacím motorem přímo vliv na produkci emisí. Otázkou však zůstává výroba akumulátoru. který obsahuje vzácné kovy, jejichž těžba je energeticky i environmentálně velmi náročná. Cílem diplomové práce je zanalyzovat energetickou náročnost a emisní stopu výroby různých typů akumulátorů. Práce obsahuje všeobecné představení metody posuzování životního cyklu výrobku (LCA – Life Cycle Assessment), na kterou navazuje kapitola ohledně konstrukce akumulátorů a jejich rozdělení podle chemického složení elektrod. Z analýzy LCA studií akumulátorů vyplývá, že energeticky nejvýhodnější z hlediska výroby je akumulátor s NMC katodou a z hlediska emisí je to akumulátor s LMO katodou. Výsledky jsou však silně ovlivněny vstupními daty, které mají LCA studie často rozdílné, proto nelze vyvodit jednoznačný závěr. Část práce se zabývá analýzou dopadů výroby akumulátoru na životní prostředí při použití různých energetických mixů a různých typů výrobních technologií. Práce může sloužit jako podklad pro detailnější zkoumání výrobní části akumulátoru a pro minimalizaci jejího dopadu tohoto na životní prostředí.

KLÍČOVÁ SLOVA

metoda posuzování životního cyklu, cradle-to-gate, energetická náročnost výroby, emise skleníkových plynů, elektromobil, akumulátor

ABSTRACT

Electromobility is a current topic and a way to reduce the carbon footprint not only in personal transport. The operation of an electric car does not have a direct impact on emissions compared to an internal combustion engine car. However, the issue remains the production of the battery, which contains rare metals that are very energy and environmentally demanding to extract. The aim of this thesis is to analyse the energy consumption and emission footprint of the production of different types of batteries. The thesis includes a general introduction to the Life Cycle Assessment (LCA) method, followed by a chapter on battery design and the classification of batteries according to electrode chemistry. The analysis of LCA studies of batteries shows that the least energy intensive battery in terms of production is the battery with NMC cathode and in terms of emissions it is the battery with LMO cathode. However, the results are strongly influenced by the input data, which are often different in LCA studies, so it is not possible to draw a clear conclusion. Part of the thesis deals with the analysis of the environmental impacts of battery production using different energy mixes and different types of production technologies. The work can serve as a basis for a more detailed investigation of the production part of the battery and for minimizing the environmental impact of this process.

KEYWORDS

life cycle assessment method, cradle-to-gate, energy consumption, green gas emissions, electric vehicle, battery pack

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DVOŘÁK, Matouš. *Metody posuzování životního cyklu akumulátorů pro BEV a PHEV vozidla*. Brno, 2024. Dostupné také z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157612. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Jan Fišer.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Bc. Jana Fišera, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 24. května 2024 ……..……..……..

Matouš Dvořák

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Bc. Janu Fišerovi, Ph.D., který mi během zpracování diplomové práce poskytnul svůj čas, mnoho cenných rad, odborných poznatků a byl mi velkou oporou. Dále mé poděkování patří mé úžasné rodině a přítelkyni, kteří mě po celou dobu studia i psaní závěrečné práce podporovali.

OBSAH

Úvod **7**

1 Vymezení cílů a limitů práce **8**

2 Metoda životního cyklu výrobku **9**
2.1 Rozdělení LCA analýzy 10
2.1.1 Definování cíle a rozsahu 11
2.1.2 Inventarizace životního cyklu 11
2.1.3 Hodnocení vlivů 11
2.1.3.1 Indikátory kategorie dopadu 11
2.1.4 Interpretace výsledků 12
2.2 Metody k posouzení environmentálních vlivů 12
2.2.1 EF v3.0 12
2.2.2 CML 12
2.2.3 EDIP 2003 12
2.2.4 TRACI 13
2.2.5 Eco-indicator 99 13
2.2.6 EPS 2000 13
2.2.7 Ekofaktor 13
2.2.8 ReCiPe 14
2.2.9 LIME 14
2.2.10 Impact 2002+ 14
2.2.11 Kumulativní energetická náročnost 14

3 Akumulátor **16**
3.1 Princip akumulátoru 16
3.2 Rozdělení akumulátorů podle chemického složení elektrod 17
3.2.1 Olověné akumulátory 18
3.2.2 Nikl kadmiové akumulátory 18
3.2.3 Nikl-metal hydridové akumulátory 18
3.2.4 Li-ion akumulátory 19
3.2.5 Lithium sirné akumulátory 21
3.2.6 Lithium vzduchové akumulátory 22
3.2.7 Sodík iontové akumulátory 22
3.2.8 Solid-state akumulátory 22
3.3 Základní konstrukční prvky akumulátoru BEV 23
3.3.1 Akumulátorové články a jejich vlastnosti 23
3.3.1.1 Cylindrický článek 24
3.3.1.2 Sáčkový/Pouch článek 24
3.3.1.3 Prizmatický článek 25
3.3.2 Bateriový modul 26
3.3.3 Akumulátorový box 27
3.3.4 Tepelný management akumulátoru 28
3.4 Degradace akumulátorů 32
3.5 Cena akumulátorů 32

4 Energetická náročnost výroby akumulátorů a její emisní stopa 34
4.1 Cradle-to-gate analýzy NMC-C akumulátorů 34
4.2 Cradle-to-gate analýzy LFP-C akumulátorů 39
4.3 Cradle-to-gate analýzy LMO-C a NCA-C akumulátorů 41
4.4 Cradle-to-gate analýzy NiMH akumulátorů 42
4.5 Shrnutí a porovnání získaných dat ohledně jednotlivých typů akumulátorů 44

5 Dopad výroby akumulátorů na životní prostředí 47
5.1 Vliv energetického mixu na emisní stopu výroby akumulátorů 47
5.2 Vliv změny výrobní technologie na energetickou náročnost a životní prostředí 49
5.3 Vliv kombinace uvažovaných opatření na emisní stopu výroby 52
5.4 Shrnutí výsledků 53

Závěr 56

Použité informační zdroje 57

Seznam použitých zkratek a symbolů 67

ÚVOD

Stále zhoršující se situace ohledně globální změny klimatu vede už řadu let ke snaze snížit produkci skleníkových plynů. Příkladem se snaží jít Evropa, která chce pomocí Zelené dohody (Green Deal) do roku 2050 dosáhnout uhlíkové neutrality. Tato dohoda byla schválena Evropskou unií (EU) v roce 2020 a zároveň se všechny členské státy EU zavázaly, že do roku 2030 sníží emise oproti úrovni v roce 1990 nejméně o 55 %. K tomuto cíli má pomoct již kompletní legislativní balíček „Fit for 55“ [1].

Jen osobní automobily a dodávky v roce 2022 byly zodpovědné za 15 % všech CO_2 emisí v Evropě [2]. Z tohoto důvodu EU už v roce 1992 zavedla Euro normy, které mají za úkol snižování emisí produkovaných dopravou. Nyní v roce 2023/2024 se výrobci automobilů řídí normou Euro 6, která v porovnání s normou Euro 5 zavádí snížení emisí NO_x o 56 %. Díky tomu dnešní automobil se vznětovým motorem musí obsahovat například zdvojený systém selektivní katalytické redukce pro snížení NO_x emisí a u zážehových motorů se jedná o oxidační katalyzátor v kombinaci se systémem sekundárního vzduchu [3]. S blížící se normou Euro 7, která má vejít v platnost v roce 2025, nepřichází jen další zpřísňování pravidel pro emise výfukových plynů, ale také nově měření emisí z oděru pneumatik a částic z brzd [4]. Automobiloví výrobci na tato nařízení reagují elektrifikací pohonů vozidel, což je v posledních letech vidět na počtu prodaných automobilů s elektrickým pohonem. Podíl elektromobilů na trhu se více než ztrojnásobil z 4 % v roce 2020 na 14 % v roce 2022 [5].

V dnešní době je však výroba elektromobilu energeticky náročnější, a to skoro dvojnásobně oproti výrobě běžného auta se spalovacím motorem, a to především kvůli akumulátorům, které obsahují ve většině případů lithium-iontové bateriové články [6]. Těžba a transport vzácných kovů používaných na jejich výrobu, přispívá k celkově vyšší uhlíkové stopě. Jestli je elektromobil ekologičtější ve fázi užívání především závisí na zdroji elektrické energie. S uvážením tohoto faktu, v Polsku, kde stále většina elektrické energie pochází z uhelných nebo plynových elektráren, je provoz elektromobilů emisně náročnější než například v Norsku, kde je produkce elektřiny převážně z obnovitelných zdrojů [6]. Situace se ale v oblasti energetiky v celé Evropě postupně a systematicky mění k udržitelnosti, což podtrhují i čísla z roku 2023, kdy se emise v elektroenergetice snížily o 19 % oproti roku 2022 [7].

V potaz se také musí brát procesy spojené s likvidací, recyklací a možným dalším využitím akumulátorů, které také produkují nebo šetří emise. V dnešní době není recyklace akumulátorů z elektromobilů příliš rozšířená, a proto se neustále pracuje na vylepšení těchto technologií, aby se snížil dopad na životní prostředí [6]. Tento proces od výroby přes provoz až po recyklaci elektromobilu je možné analyzovat metodou životního cyklu výrobku (LCA), která měří, do jaké míry produkt zatěžuje životní prostředí.

Cílem této diplomové práce je shromáždit informace ohledně materiálového složení a energetické náročnosti výroby různých akumulátorů pro bateriová a plug-in vozidla. Tato získaná data jsou dále utříbena tak, aby bylo možné použít metodu LCA pro posouzení dopadů na životní prostředí u jednotlivých typů akumulátorů.

1 VYMEZENÍ CÍLŮ A LIMITŮ PRÁCE

Vymezení cílů práce

- Popsání metody životního cyklu výrobku.
- Shrnutí různých druhů akumulátorů podle chemického složení elektrod.
- Popsání hlavních konstrukčních prvků akumulátoru.
- Analyzování LCA studií se zaměřením na energetickou náročnost a emisní stopu výroby.
- Posouzení dopadů výroby akumulátorů na životní prostředí.

Vymezení limitů práce

- Práce se vztahuje jen na akumulátory v elektrických a plug-in vozidlech.
- Práce se zaměřuje jen na výrobní fázi v životním cyklu akumulátoru nikoliv na celý životní cyklus.
- Analýza LCA studií se především zaměřuje na NMC akumulátory.
- Práce zkoumá především studie publikované v rozmezí let 2016 až 2024.

2 METODA ŽIVOTNÍHO CYKLU VÝROBKU

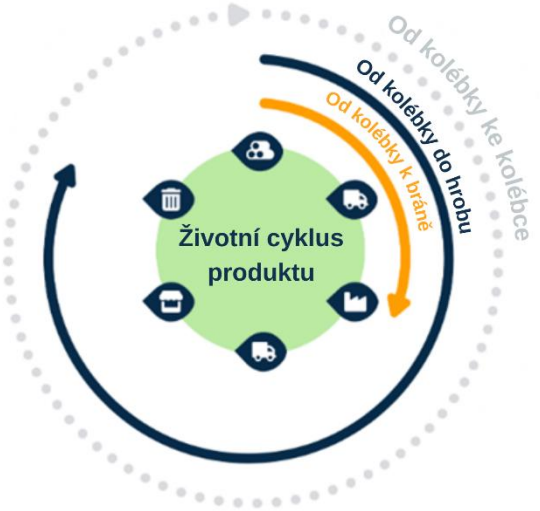
Posuzování životního cyklu, zkráceně LCA (Life Cycle Assessment), představuje analytickou metodu, která hodnotí potenciální dopady produktů, služeb nebo technologií na životní prostředí. Metoda LCA zkoumá celý životní cyklus daného produktu, od fáze těžby a výroby primárních surovin, přes samotný výrobní proces, dobu užívání až následnou likvidaci či recyklaci materiálů obsažených v konkrétním výrobku. Tento komplexní přístup umožňuje posoudit skutečné dopady na životní prostředí a poskytuje informace pro rozhodování o vhodnosti využívání ekoinovačních technik. Termín ekoinovace obecně označuje nové postupy nebo techniky, které minimalizují negativní vlivy lidských činností na životní prostředí [38]. Mezinárodní organizace pro normalizaci udává pokyny a požadavky pro provádění posouzení životního cyklu podle norem ISO 14040 a 14044 [39].

Obr. 1 Fáze životního cyklu výrobku, upravené [40]

LCA studie je možné rozdělit obvykle na 4 koncepty v závislosti na zkoumané fázi životního cyklu. Tím nejčastějším je analýza celého životního cyklu tzv. „od kolébky do hrobu“ (z angl. cradle-to-grave), kde jsou zahrnuty fáze těžby surovin, užívání a likvidace. Další fáze sleduje výrobek jen z části životního cyklu, a to od těžby surovin až po konec výrobní části, tedy po expedici k zákazníkovi. Tento přístup se nazývá „od kolébky k bráně“ (z angl. cradle-to-gate). Koncept „od kolébky ke kolébce“ (z angl. cradle-to-cradle nebo také closed-loop recycling) je často spojovaný s cirkulární ekonomikou, protože nahrazuje finální fázi likvidace recyklačním procesem, díky němuž se buď celý výrobek nebo jeho část použije na vyrobení dalšího produktu. Posledním konceptem je „od brány k bráně“ (z angl. gate-to-gate), který se používá pro zkoumání jednoho konkrétního procesu v celém výrobním řetězci, kvůli snížení složitosti. Spojením více těchto gate-to-gate posouzení lze vytvořit cradle-to-gate hodnocení [39].

Existuje také další analýza „od studně na kola“ (z angl. well-to-wheel), která se ještě rozděluje na podskupiny jako well-to-station, well-to-tank, tank-to-wheel anebo plug-to-wheel. Jedná se

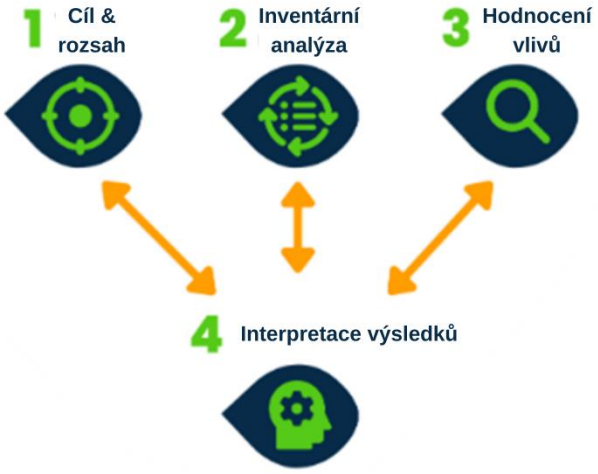
o komplexní metodu hodnocení energetické účinnosti a emisí, přesněji sleduje celkovou spotřebu energie a produkci emisí skleníkových plynů během celého životního cyklu zdroje energie. Konkrétně u dopravních prostředků analyzuje celkovou spotřebu energie a emise vyprodukované na výrobu paliva (well-to-tank) a zároveň emise vytvořené během provozu (tank-to-wheel). Do výsledků well-to-wheel analýzy nevstupují emise a energie spojené s výrobou a likvidací, popřípadě recyklací dopravního prostředku [41][42].



Obr. 2 Koncepty používané při sledování životního cyklu výrobku, upravené [40]

2.1 ROZDĚLENÍ LCA ANALÝZY

Metoda posuzovaní životního cyklu výrobku se skládá ze čtyř hlavních fází (definice cíle a rozsahu, inventární analýza, hodnocení vlivů a interpretace výsledků), které se navzájem ovlivňují (Obr. 3). To znamená, že někdy je nutné se vrátit k předchozí fázi a optimalizovat analýzu na základě nových zjištění z probíhající fáze, a proto je LCA metoda považována za iterativní proces [40].



Obr. 3 Schéma čtyř hlavních fází metody posuzování životního cyklu výrobku, upravené [40]

2.1.1 DEFINOVÁNÍ CÍLE A ROZSAHU

V první fázi posuzování životního cyklu je nutné definovat, co přesně bude podléhat analýze a v jakém rozsahu. Určení hranic analýzy je velice důležité, aby se jasně definovalo, jak moc podrobně se bude daný výrobek zkoumat. Otázku zde tedy je, jestli se výrobek bude sledovat po celý životní cyklus (cradle-to-grave) nebo se bude pozorovat jen jeho část, například ta výrobní (cradle-to-gate). Dále se musí zvolit kategorie dopadů, které mají být posuzovány a zvolení vhodné metody. V neposlední řadě se určuje funkční jednotka, ke které budou vztaženy data pro srovnání výsledků [39][40].

2.1.2 INVENTARIZACE ŽIVOTNÍHO CYKLU

Inventarizace životního cyklu, zkráceně LCI (z angl. Life Cycle Inventory), je proces sběru a zpracování dat, kde výsledkem je seznam všech vstupů a výstupů ze systému spojených s životním cyklem výrobku. Příklady vstupů mohou být použité suroviny, zdroje energie a příklady výstupů jsou většinou emise do ovzduší, půdy nebo vody [40]. Navrhování produktového systému často probíhá za pomoci specializovaného databázového software. Tento software slouží ke sběru informací o množství látek uvolněných do životního prostředí formou různých emisí během celého životního cyklu výrobku. Data získaná tímto způsobem se nazývají ekovektor produktu a často jsou prezentována ve formě tabulky, známé jako inventarizační tabulka [38].

2.1.3 HODNOCENÍ VLIVŮ

Po sběru a zpracování dat přichází na řadu jejich vyhodnocení. Jako první probíhá klasifikace, kde jsou elementární toky z LCI fáze přiřazeny ke kategoriím dopadů, ke kterým přispívají. Následuje klasifikace, která posuzuje toky podle toho, do jaké míry přispívají k jednotlivým dopadům [42]. Kategorií dopadů je mnoho, ale mezi nejsledovanější patří toxicita pro člověka, ekotoxicita, potenciál globálního oteplování a acidifikace [40]. Výsledky s konkrétními hodnotami a jasně definovanými jednotkami tvoří charakterizační faktor. Po charakterizaci je běžně prováděna normalizace, což spočívá ve vztahu výsledků charakterizace k referenčnímu údaji. Volitelným prvkem hodnocení dopadů je vážení, které vyjadřuje důležitost kategorií dopadů s ohledem na ekonomicko-sociální hlediska [38].

2.1.3.1 INDIKÁTORY KATEGORIE DOPADU

Indikátory kategorií dopadů slouží k zjištění, jak moc negativně elementární toky zasahují do životní prostředí. Indikátory kategorie vlivu se dělí do dvou skupin podle toho, v jaké části environmentálního mechanismu jsou zvoleny. Midpointové indikátory jsou ty, které jsou vybrány ve počáteční fázi environmentálního mechanismu. Tento postup poskytuje lépe měřitelný výsledek ale s méně relevantním významem pro životní prostředí, kvůli nepřímému styku s problémy přímo pozorovatelnými na konci řetězce. Endpointové indikátory jsou měřené na konci environmentálního mechanismu, čímž poskytují relevantnější informace spojené s přímým působením na životní prostředí, avšak s tím roste jistá míra nepřesnosti. Velké množství midpointových indikátorů přispívá k relativně malému množství těch endpointových [43].

2.1.4 INTERPRETACE VÝSLEDKŮ

Finální fázi je interpretace výsledků životního cyklu produktu na základě získaných informací. Tato část obsahuje nejen použitý postup, ale také udává všechny omezení, zjednodušení a předpoklady, které musely být aplikovány pro dosáhnutí výsledků. Hlavní částí této fáze je vyhodnocení samotné LCA studie, tedy vyvození závěrů a stanovení doporučení pro cílovou skupinu [39][40].

2.2 METODY K POSOUZENÍ ENVIRONMENTÁLNÍCH VLIVŮ

K posouzení environmentálních dopadů na životní prostředí existuje několik LCIA (Life Cycle Impact Assessment) metod. Tyto metody transformují shromážděné údaje o elementárních tocích na indikátory kategorie dopadů, tak aby vznikl číselný výsledek, který je možné interpretovat. Měření nejrůznějších způsobů ovlivňování životního prostředí a kvantifikace dopadů není vzhledem ke složitosti a vzájemné provázanosti životního prostředí jednoduchým úkolem. Metody LCIA řeší tuto výzvu seskupováním a kategorizací typů dopadů, které mají procesy na různé aspekty životního prostředí, jako je například využívání vody, změna klimatu nebo toxicita. Různé emise, které způsobují stejný dopad, jsou převedeny na jednu jednotku, která se promítne do jedné kategorie dopadu. Různé metody kvantifikují různé kategorie dopadů v závislosti na tom, na co se studie zaměřuje. Nejběžnější metody posuzování environmentálních vlivů jsou rozepsány v podkapitolách níže.

2.2.1 EF v3.0

EF (Environmental Footprint) v3.0 metoda je metoda s cílem snížit negativní vlivy produktů a služeb na životní prostředí. Tato metoda sleduje produkty od těžby surovin až po likvidaci, tedy průběh celého jejich životního cyklu. Zkoumá 16 různých dopadů na životní prostředí, včetně změny klimatu a dopadů souvisejících s vodou, ovzduším, zdroji, využíváním půdy a toxicitou [45]. Iniciativa EF v3.0 byla vedená Společným výzkumným střediskem (JRC), vědeckou a znalostní službou Evropské komise. Projekt oficiálně začal v roce 2013 a byl rozdělen do 2 fází: Pilotní fáze (2013-2018) a Přechodová fáze (2019 – dosud) [44].

2.2.2 CML

CML je midpointová metoda, která byla vynaleznuta v roce 1992 Institutem environmentálních věd univerzity v Leidenu (Institute of Environmental Sciences of the University of Leiden). CML metoda rozděluje kategorie dopadů do dvou skupin: na základní (povinné) kategorie dopadů, které jsou používané ve většině LCA studií, a volitelné (doplňkové), což jsou provozní kategorie dopadů závislé na požadavcích určité studie. Mezi základní kategorie dopadů například patří: vyčerpání abiotických zdrojů, změna klimatu, toxicita pro člověka, úbytek stratosférického ozonu, ekotoxicita pro sladkovodní, mořské a suchozemské prostředí a acidifikace. Volitelné kategorie dopadů, které mohou být zahrnuty do studie, jsou například: ztráta biodiverzity, vlivy ionizujícího záření, hluk, odpadní teplo, zápach vzduchu anebo zápach vody [46].

2.2.3 EDIP 2003

Metoda EDIP (Environmental Design of Industrial Products) je další z midpointových metod, která byla představena v roce 1996 Institutem pro vývoj produktů na Technické univerzitě v Dánsku. Nejprve se jednalo o metodu stanovenou v roce 1997 EDIP 97, která zahrnovala dopady související s emisemi využívaných zdrojů a dopady na pracovní prostředí [46]. V roce 2003 byla tato metoda nahrazena metodou EDIP 2003, ve které byly provedeny změny týkající

se vylepšení v oblasti charakterizačních faktorů. Přesněji šlo o použití různých charakterizačních faktorů pro stejné elementární toky, avšak produkovaných v různých lokalitách [38]. Kategorie dopadů, které se v souvislosti s touto metodou zvažují, jsou následující: globální oteplování, úbytek ozonu, acidifikace, suchozemská a vodní eutrofizace. Fotochemická tvorba ozonu, toxicita pro člověka, ekotoxicita a hluk [46].

2.2.4 TRACI

TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts) je jednou z dalších midpointových metod, která byla vyvinuta v USA agenturou pro ochranu životního prostředí (EPA) se záměrem pomoct přesněji posuzovat dopady procesního designu a zlepšit prevenci znečištění [46]. Tato metoda byla představena v roce 2003 a navazovala na již stávající normy a pokyny US EPA. Je určena především pro použití v USA a zaměřuje se na kategorie dopadů, jako jsou například: globální oteplování, poškození ozónové vrstvy, tvorba smogu, acidifikace, eutrofizace, ekotoxicita a vyčerpaní fosilních paliv [47].

2.2.5 ECO-INDICATOR 99

Metoda Eco Indicator 99 (EI99) patří mezi endpointové metody a vychází z metody Eco Indicator 95 (EI95), která byla vynalezena v roce 1995 v rámci nizozemského programu NOH [46]. V anglických článcích je tato metoda také někdy označována jako damage oriented anebo top-down a jejich hlavním cílem je vyčíslení reálných škod v životním prostředí [38]. Aktualizace metody EI99 oproti předchozí verzi EI95 spočívá v poskytnutí lepšího vědeckého základu pro zkoumané modely poškození, rozšíření seznamu indikátorů a vylepšení metodiky výpočtů indikátorů. Zahrnuté kategorie dopadů na životní prostředí jsou například: změna klimatu, poškození ozonové vrstvy, acidifikace, eutrofizace, karcinogenní a respirační účinky a nerostné a fosilní zdroje. Tyto kategorie se potom dále sdružují do tří oblasti ochrany: kvalita ekologického systému, lidské zdraví a přírodní zdroje [46].

2.2.6 EPS 2000

Metoda EPS (Environmental Priority Strategies in product design) je další endpointová metoda, která byla vyvinuta v roce 1989 ve spolupráci společnosti Volvo, Švédského institutu pro environmentální výzkum a Švédské federace průmyslu s cílem mít nástroj, který efektivně identifikuje environmentální požadavky v procesu vývoje výrobku [48]. Kategorie dopadů zohledněné v této metodě jsou: očekávaná délka života, nemocnost, kapacita produkce obtížných plodin, kapacita produkce ryb a masa, vyčerpání fosilních paliv a vyčerpání zásob nerostných surovin. Tyto kategorie jsou rozděleny do čtyř oblastí ochrany: lidské zdraví, produkční kapacita ekologického systému, biologická rozmanitost a abiotické zdroje [46]. Výsledky této metody jsou uvedené v jednotkách ELU (jednotky environmentální zátěže), kde jedna ELU představuje externalitu odpovídající jednomu euru nákladů na poškození životního prostředí [48].

2.2.7 EKOFAKTOR

Metoda Ekofaktor se řadí mezi endpointové metody a poprvé byla představena v roce 1990 a později v roce 1997 ve Švýcarsku byla zveřejněna v celém jejím znění. Porovnává stav životního prostředí mezi jeho současným stavem a stavem stanoveným v právních předpisech. Ukazateli této metody jsou ekofaktory, které měří vliv emisí na životní prostředí v eko-bodech (UBP). Mezi tyto ekofaktory patří: poškození ozonové vrstvy torba fotochemických oxidantů. Emise do ovzduší, radioaktivní emise a spotřeba vody. Metoda je především určená pro oblast

Švýcarska, ale je možné ji použít i v krajinách jako je Belgie, Švédsko, Nizozemsko, Norsko nebo Japonsko [38][46].

2.2.8 ReCiPe

Metoda ReCiPe je založena na kombinaci midpointových a endpointových indikátorů a je považována za pokračování metod CML 2002 a EI99. Tuto metodu vyvinuli společně Radbound University of Nijmegen, CML a PRé Consultants v roce 2008 a podle nichž se i tato metoda jmenuje. V roce 2016 vyšla aktualizovaná verze, která poskytuje charakterizační faktory, které jsou reprezentativní pro globální měřítko namísto jen evropského. Zároveň zachovává možnost zavést charakterizační faktory kategorie dopadů pro jednotlivé země a kontinenty [49]. Metoda obsahuje 18 midpointových kategorií dopadů 3 endpointové – lidské zdraví, kvalitu ekosystému a nedostatek zdrojů [38].

2.2.9 LIME

Metoda LIME byla vyvinuta v Japonsku v rámci národního projektu ohledně LCA financovaného japonským ministerstvem hospodářství, obchodu a průmyslu (METI) a národní agenturou pro výzkum a vývoj (NEDO). Hlavním účelem této metody je kvantifikace negativních dopadů na životní prostředí vyvolané různými událostmi v Japonsku. Tato metoda se řadí mezi ty, které využívají kombinace midpointových a endpointových indikátorů. Příklady midpointových kategorií dopadů jsou: poškozování ozonové vrstvy, globální oteplování, acidifikace, fotochemická tvorba oxidantů, využívání půdy a ekologicky toxické chemické látky. Mezi ty endpointové patří například: rakovina kůže, respirační onemocnění, infekční onemocnění, spotřeba energie, zemědělská produkce a suchozemský a vodní ekosystém. Endpointové kategorie se dají rozdělit do čtyř okruhů ochrany: lidské zdraví, sociální blahobyt, čistá primární produkce a biologická rozmanitost [46].

2.2.10 Impact 2002+

Metoda Impact 2002+ zkoumá jak midpointové tak endpointové kategorie dopadů na životní prostředí a byla vyvinuta Švýcarským federálním technologickým institutem (EPFL) [46]. První verze byla zveřejněna v roce 2002 a poté se v průběhu let zaváděly nové úpravy týkající se srovnávacího hodnocení některých kategorií dopadů. Příklady midpointových kategorií jsou: respirační účinky, toxicita pro člověka, vodní ekotoxicita, suchozemská eutrofizace a acidifikace, globální oteplování a neobnovitelné zdroje energie. Prostřednictvím těchto midpointových indikátorů jsou výsledky inventarizace spojeny se čtyřmi endpointovými kategoriemi: lidské zdraví, kvalita ekologické systému, změna klimatu a zdroje [50].

2.2.11 Kumulativní energetická náročnost

Kumulativní energetická náročnost (Cumulative Energy Demand; CED) je parametr a metodika používaná ke kvantifikaci přímé a nepřímé spotřeby energie během celého životního cyklu výrobku nebo procesu. Zohledňuje energii obsaženou ve fosilních zdrojích (černé uhlí, hnědé uhlí, zemní plyn a ropa), jaderných zdrojích a obnovitelných zdrojích (biomasa, vodní, větrná a sluneční energie), která je hodnocena jako primární energie. Do této hodnoty se mimo jiné započítává energie spotřebovaná při těžbě, výrobě a likvidaci materiálů. CED se většinou používá jako doplňkový nástroj vedle ostatních LCIA metodik, tak aby studie poskytla informace o kritické části životního cyklu výrobku nebo procesu z pohledu největší spotřeby energie [46].

Existují další metody LCIA jako například: EDP, LUCAS, JEPIX, BEES, MEEup a další. Výběr metody většinou závisí na zkoumaném cíli, ale jelikož některé metody mají podobné indikátory, tak se nedá s jistotou říct, která metoda je lepší. S přibývajícím důrazem na sledování životního prostředí se dá do budoucna očekávat další vývoj ať už nových či stávajících metod sledujících životní cyklus výrobku.

3 AKUMULÁTOR

Akumulátor je nepostradatelnou součástí elektromobilu a jeho hlavní částí jsou bateriové články, které jsou zdrojem elektrické energie. V třicátých letech 20. století byl v Bagdádu nalezen objekt starý více než 2000 let a připomínal dnešní baterii. Tato baterie se skládala z hliněné nádoby, uvnitř které se nacházel měděný válec spolu s železnou tyčkou. Po naplnění nádoby kyselou tekutinou, kterou mohl být ocet nebo víno, byla baterie schopná vyprodukovat napětí mezi 1 až 2 V [8].

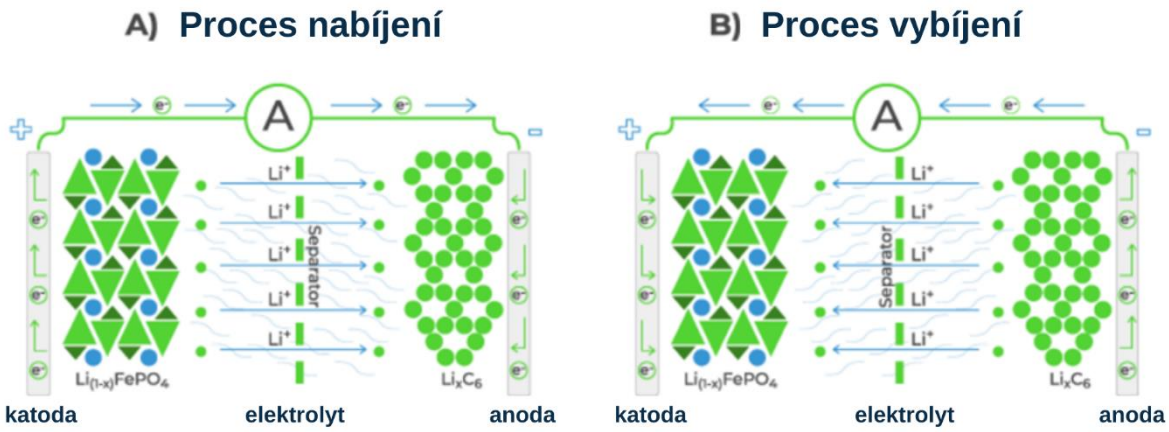
Dalším významným milníkem ve vývoji baterií je rok 1800, kdy italský fyzik Alessandro Volta vynalezl první elektrochemický článek pro ukládání energie. Tento článek, známý jako Voltaova baterie, se skládal ze dvou kovových destiček – jedna byla zinek a druhá měď. Tyto destičky fungovaly jako elektrody a byly odděleny látkou nasáklou elektrolytem, a to buď kyselinou sírovou nebo solným roztokem. Propojením horního a dolního kontaktu pomocí drátu vzniklo na článku napětí, jehož velikost byla závislá na počtu kovových destiček [8].

Velkým pokrokem v historii baterií byl vynález francouzského fyzika Gastona Planta v roce 1859, který představil první dobíjecí olověný akumulátor. Tento vynález představoval základ pro moderní olověné baterie, které se dnes používají v každém automobilu [8]. V roce 1899 představil švédský vynálezce Waldemar Jungner nikl kadmiovou (NiCd) baterii, která nabízela lepší vlastnosti než olověné baterie, ale překážkou byla vysoká cena niklu a kadmia [68]. Po mnoho let byly NiCd baterie primární volbou pro všechny možné elektronické přístroje od vysílaček přes zdravotnické vybavení až po profesionální videokamery. Dokonce v 80. letech 20. století byly představeny vysokokapacitní NiCd baterie, které vykazovaly až o 60 % vyšší kapacitu oproti těm standartním. Postupně se ale začaly používat jiné druhy baterií a v 90. letech 20. století NiCd baterie ztratily až 80 % svého podílu na trhu. Ve stejném období, přesněji v roce 1989, byl na trh uveden nikl-metal hydridový (NiMH) článek, který vykazoval lepší stabilitu a větší energetickou hustotu než NiCd a zároveň eliminoval použití toxického kadmia. NiMH baterie jsou používány v digitálních kamerách a také byly použity v prvních hybridních vozidlech, jako je například Toyota Prius. Dva roky po uvedení NiMH baterie na trh, představila v roce 1991 firma Sony lithium-iontový (Li-ion) akumulátor, který při menších rozměrech vykazoval lepší vlastnosti, jako delší výdrž baterie, vyšší výkon a energetická hustota a lepší stabilita [67][68]. Vývoj lithium-iontových baterií jde neustále dopředu a v současné době jsou používány ke všem možným účelům od elektroniky přes elektromobily až po uložiště energie. S rozvojem elektromobility jsou také hledány další konstrukce akumulátorů s elektrodami na bázi prvků jako sodík či draslík nebo také na bázi sloučenin síry jako alternativa k lithium-iontovým. Podrobnější popis jednotlivých konstrukcí a jejich vlastností je uveden v následujících kapitolách.

3.1 PRINCIP AKUMULÁTORU

Akumulátor je elektrochemický (galvanický) článek, který slouží k uchovávání a přeměně chemické energie na elektrickou energii. Elektrochemický článek je složen ze dvou elektrod, záporné elektrody (katoda) a kladné elektrody (anoda), oddělených elektrolytem [9]. Tento uzavřený elektrický obvod je možné vybíjet a nabíjet díky chemické reakci. Při procesu vybíjení dochází k přemisťování elektronů ze záporně nabité elektrody na kladně nabitou elektrodu, čímž se chemická energie přeměňuje na elektrickou. Tento děj je známý jako redukčně-oxidační reakce. Proces nabíjení je opačný, tedy elektrony se přemisťují od kladné elektrody k záporné nabité elektrodě [64]. V případě lithium iontového akumulátoru se kladná a záporná elektroda skládá z vodivé fólie potažené aktivním materiálem. Pro kladnou elektrodu je tato

fólie většinou vyrobena z mědi a nejčastěji bývá potažena grafitem. Fólie záporné elektrody je obvykle hliníková a bývá potažena různými typy aktivního materiálu. Tyto typy jsou většinou založeny na kombinaci různých kovů, jak je nikl, mangan, kobalt, hliník, železo, fosfát a titan. Podrobněji jsou tyto kombinace uvedeny v kapitole 3.2.4. Do aktivních materiálů se přidává ještě pojivo, aby se vytvořila homogenní směs, která je nanesena na již zmiňované fólie. Elektrody jsou od sebe odděleny separátorem a prostor mezi nimi je vyplněn elektrolytem na bázi roztoku lithné soli, nejpoužívanějším je hexafluorofosforečnan lithný ($LiPF_6$). Elektrody a separátor mají pórovitou strukturu, tak aby ionty lithia mohly vstupovat do struktur elektrod. Při procesu vybíjení to tedy znamená, že kladné ionty lithia se pohybují směrem od anody skrz separátor ke katodě, přičemž volné elektrony prochází vnějším obvodem a vytvářejí elektrickou energii. Při dobíjení se ionty lithia a elektrony vrací k záporné elektrodě a cyklus se opakuje [29][23][21].



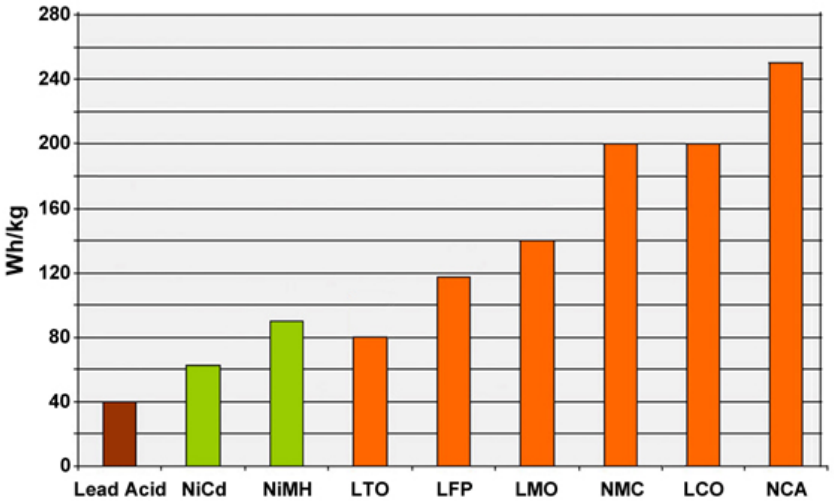
Obr. 4 Proces nabíjení a vybíjení akumulátoru s LFP katodou a grafitovou anodou, upravené [23]

3.2 ROZDĚLENÍ AKUMULÁTORŮ PODLE CHEMICKÉHO SLOŽENÍ ELEKTROD

Akumulátory dělíme dle chemického složení elektrod na tyto základní typy:

- olověné,
- nikl kadmiové,
- nikl-metal hydridové,
- lithium iontové,
- lithium sirné,
- lithium vzduchové,
- sodík iontové a
- solid-state.

V dnešních bateriových elektromobilech se používají především akumulátory Li-ion v mnoha různých modifikacích, nicméně v této kapitole budou blíže představeny všechny výše zmíněné typy akumulátorů, aby byly uvedeny základní rozdíly ve funkčnosti článků a popsány jejich hlavní parametry. Obr. 5 zobrazuje energetickou hustotu na jeden kilogram akumulátorového článku pro různé typy elektrod.



Obr. 5 Porovnání jednotlivých akumulátorů podle energetické hustoty [31]

3.2.1 OLOVĚNÉ AKUMULÁTORY

Olověné akumulátory patří mezi úplně první baterie s možností opětovného nabíjení, které byly uvedeny na trh pro komerční užití. Jejich energetická hustota se pohybuje v rozmezí 30–50 Wh/kg, což je také jeden z důvodu, proč byly nahrazeny jinými akumulátory vykazující vyšší kapacitu. Krátká životnost u těchto akumulátorů je způsobena mřížkovou korozí na kladné elektrodě, vyčerpáním aktivního materiálu a roztažením kladných destiček. Tyto změny se nejvíce projevují při vyšších provozních teplotách a nedá se jim zabránit nebo předejít ani cyklováním baterie [34]. V posledních letech se ukazuje, že olověné baterie jsou výjimečné v míře jejich recyklace. Studie s názvem National Recycling Rate Study zjistila, že olověné baterie jsou nejrecyklovanějším spotřebním výrobkem v USA s 99% mírou recyklace, a tři hlavní části této baterie (olovo, plast a kyselina) jsou dokonce 100% recyklovatelné. Nové olověné baterie jsou vyrobeny minimálně z 80 % z recyklovaného materiálu, a tak se z hlediska recyklace tedy jedná o nejudržitelnější typ baterie v porovnání s ostatními [70].

3.2.2 NIKL KADMIOVÉ AKUMULÁTORY

Nikl-kadmium akumulátory se oproti ostatním akumulátorům liší především provozními podmínkami. Vyhovuje jim rychlé nabíjení a střídavý proud, kdežto Li-ion a NiMH akumulátory preferují mělké vybíjení a nabíjení. U NiCd akumulátorů je důležité, aby byly neustále v provozu a občas došlo i k úplnému vybití, jinak se na destičkách článku mohou vytvořit velké krystaly, které postupně způsobují úbytek na výkonu. Mezi další výhody patří dobrá cena na počet nabíjecích/vybíjecích cyklů. Nevýhody oproti jiným akumulátorům jsou nízká energetická hustota (45–80 Wh/kg) a relativně vysoká schopnost samovybíjení [34].

3.2.3 NIKL-METAL HYDRIDOVÉ AKUMULÁTORY

Nikl-metal hydridové akumulátory jsou nástupci těch nikl-kadmiových a nabízí až o 40 % vyšší energetickou hustotu než NiCd, tedy zhruba 60–120 Wh/kg.[34]. Mají stejnou kladnou elektrodu článku, která je tvořena hydroxidem niklu a záporná elektroda hydridem kovu [33]. NiMH akumulátory jsou populární volbou především pro hybridní automobily, jako je například Toyota Prius. Jednou z hlavních výhod je robustnost a odolnost zároveň s dlouhou životností. Nevýhodou je menší energetická hustota a vyšší úroveň samovybíjení v porovnání s Li-ion akumulátory. Z tohoto důvodu jsou spíše používány v hybridních vozech kvůli kratší

dojezdové vzdálenosti na jedno nabití. Další nevýhodou je chování v extrémním teplotních podmínkách, kdy při vysoké teplotě je negativně ovlivněn výkon a při nízké teplotě schopnost přenést plný výkon [32].

3.2.4 LI-ION AKUMULÁTORY

V poslední době lze pozorovat v mnoha oblastech trend směrem od používání nikl-kadmiových a nikl-metal hydridových akumulátorů směrem k lithiovým variantám. Lithiové akumulátory se začaly komerčně prosazovat od počátku devadesátých let a ve většině aspektů předčily běžné NiCd, NiMH i olověné typy. Jejich zásadní výhodou je vyšší jak hmotnostní, tak objemová energetická hustota. Dále vykazují nižší schopnost samovybíjení než ostatní varianty akumulátorů a nabíjení je možné provádět v jakémkoliv stavu vybití, aniž by to negativně ovlivnilo výkon akumulátoru [29].

Většina Li-ion akumulátorů má zápornou elektrodu vyrobenou z uhlíkového materiálu (grafit), ale dají se ještě rozdělit podle toho, jaký typ kladné elektrody využívají. Mezi nejčastější patří lithium-kobalt oxid ($LiCoO_2$), lithium-mangan oxid ($LiMn_2O_4$) a lithium-nikl dioxid ($LiNiO_2$) [29]. Hlavní odlišností oproti jiným typům akumulátorů je to, že mezi ionty lithia a materiálem anody neprobíhá chemická reakce a tyto ionty pouze vstupují do struktury záporné elektrody, což vede k delší životnosti a stabilitě výkonu akumulátoru. Dalším rozdílem je vyšší jmenovité napětí, které dosahuje u Li-ion akumulátorů hodnot 3,6 až 3,7 V na článek. S touto výhodou se pojí i vyšší energetická hustota, která se pohybuje mezi cca 150–200 Wh/kg [29]. Rozsah teplot, ve kterém jsou Li-ion akumulátory schopny fungovat, se pohybuje od -20 °C do 60 °C, ale optimální provozní teplota se nachází mezi 15 až 35 °C [19]. Dále v práci jsou Li-ion akumulátory rozebrány podrobněji z hlediska použitého materiálu katody.

LITHIUM-NIKL-MANGAN-KOBALT (NMC)

Katoda tohoto článku obsahuje velké množství niklu v porovnání s ostatníma dvěma kovy, protože nikl je zodpovědný za vyšší energetickou hustotu, což vede k delší výdrži baterie. Na druhou stranu vysoký obsah niklu způsobuje nestabilitu baterie a z toho důvodu jsou v článku obsaženy ještě kovy jako kobalt a mangan, které se starají o tepelnou stabilitu a stabilitu obecně. Baterie jsou vždy pojmenovány podle poměru kovů obsažených v článku (např. NMC811 – 80 % nikl, 10 % mangan, 10 % kobalt) [30]. Hodnoty jmenovitého napětí ukazují 3,6 až 3,7 V, ale provozní napětí se pohybuje v rozmezí 3,0–4,2 V na článek a energetická hustota je v rozmezí 150–220 Wh/kg [31].

LITHIUM-NIKL-KOBALT-HLINÍK (NCA)

NCA článek využívá výhody niklu stejně jako NMC, tedy vysokou energetickou hustotu, specifický výkon a dlouhou životnost, ale místo manganu využívá hliník jako stabilizační prvek. Problémem u těchto katod je menší bezpečnost a pořizovací cena je relativně vysoká, a tak jsou spíše používány jen ve výkonnějších modelech elektromobilů [30][31]. Jmenovité napětí u NCA článku činí 3,6 V a provozní napětí je ve stejném rozmezí jako u NMC a tedy od 3 do 4,2 V na článek. Energetická hustota je v porovnání s NMC vyšší a dosahuje hodnot 200–260 Wh/kg, ale v budoucnu se předpokládá až 300 Wh/kg [31].

LITHIUM-ŽELEZO-FOSFÁT (LFP)

Použití materiálů jako železo a fosfát namísto niklu, kobaltu nebo manganu dělá LFP akumulátory levnější, což je však vykoupeno nižším jmenovitým napětím (3,2 V), provozním

napětím (2,5–3,7 V) a energetickou hustotou (90–120 Wh/kg) [31]. Na druhou stranu jejich hlavními výhodami jsou chemická a tepelná stabilita, dlouhá životnost a vysoká proudová zatížitelnost. Díky těmto vlastnostem se spíše hodí pro elektromobily se standardním nebo krátkým dojezdem anebo v systémech na uložení energie [30].

LITHIUM-KOBALT (LCO)

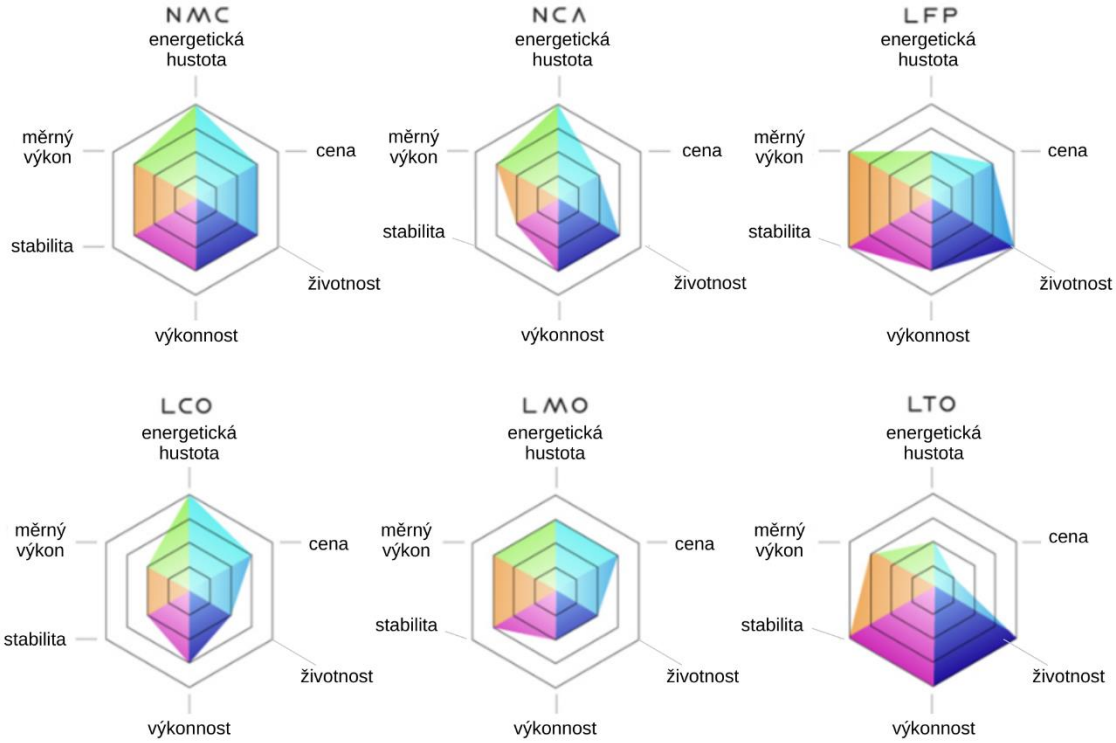
LCO články nijak nevynikají v porovnání s NCA nebo NMC. Nabízejí sice stejné hodnoty jmenovitého a provozního napětí a také stejné energetické hustoty, ale výkon, bezpečnost a životnost vykazuje horší hodnoty. Z tohoto důvodu je aplikace těchto baterií spíše v chytrých telefonech a noteboocích, kde mohou dodávat relativně malé množství energie po dlouhou dobu [30] [31].

LITHIUM-MANGAN (LMO)

LMO katody nabízí lepší bezpečnost a rychlou schopnost nabíjení a vybíjení. Z pohledu jmenovitého a provozního napětí mají stejné hodnoty jako NMC nebo NCA ale vykazují menší energetickou hustotu (100–150 Wh/kg). Sami o sobě nevykazují nijak velkou výhodu, a proto pro použití v elektrických vozidlech jsou často spojeny s NMC, kde LMO část poskytuje vysoký proud při akceleraci a NMC umožňuje delší dojezd. Tento typ akumulátorů (LMO-NMC) je například použit v elektromobilech jako jsou Nissan Leaf, Chevy Volt a BMW i3 [30][31].

LITHIUM-TITAN (LTO)

Tento typ akumulátoru se oproti ostatním neliší jiným typem materiálu na katodě ale na anodě, kde se používá na povrch záporně nabité elektrody směs oxidu lithia a titanu [30]. Chemické složení katody v tomto článku je většinou LMO nebo NMC. Výhoda LTO oproti ostatním Li-ion akumulátorům je především ve výborné stabilitě a výkonu při extrémních teplotách a také delší životnosti. Nevýhodou je nízké jmenovité napětí o hodnotě 2,4 V a provozní napětí v rozmezí 1,8–2,9 V. S tím se pojí i nízká energetická hustota, která se pohybuje v rozmezí 50–80 Wh/kg [31].



Obr. 6 Grafické znázornění vlastností jednotlivých Li-ion článků, upravené [30]

3.2.5 LITHIUM SIRNÉ AKUMULÁTORY

Koncept elektrochemické přeměny a skladování energie za využití síry jako kladné elektrody v anodové baterii z alkalických kovů pochází už z 60. let 20. století [61]. V lithium sirných (Li-S) bateriích je na výrobu katody použita síra a na anodu lithium, což se odlišuje oproti běžným lithium iontových baterií, kde katoda je zpravidla sloučeninou lithia a dalších kovů a anoda je z uhlíkového materiálu [59]. Zdroj [61] uvádí napětí Li-síra článku 2,2 V a k tomu teoretickou energetickou hustotu 2567 Wh/kg, což nabízí větší potenciál v uchovávání energie na jednotku hmotnosti než Li-ion baterie. Cenové náklady na výrobu se jeví nižší než u Li-ion akumulátorů, díky hojně dostupné a levné síře. Míra samovybíjení se ukazuje nižší v porovnání s Li-ion, avšak životnost tento typ baterie vykazuje horší v důsledku rozpouštění polysulfidů lithia a degradaci sirných katod během nabíjecích a vybíjecích cyklů [59]. Nicméně potenciální počet životních cyklu u Li-S baterie je až 1000 cyklů oproti 850 u Li-ion [71].

V současné době se zkoumají organické materiály jako možné materiály pro výrobu katody a dají se rozdělit na tři skupiny: organické sloučeniny sulfidů, sloučeniny sulfidu uhlíku a aktivní síra. Například struktury organických sloučenin sulfidů vykazují dobré redoxní a relativně rychlé elektrodové reakce, což je činí vhodnými materiály pro uchovávání energie. Jejich elektrochemická reakce je však vcelku pomalá, a tak se musí používat až při teplotě 100 °C. Překážka organického aktivního materiálu katody je změna chemické struktury materiálu během dlouhodobého cyklování baterie [60].

3.2.6 LITHIUM VZDUCHOVÉ AKUMULÁTORY

První zmínka o lithium vzduchových článcích je z roku 1996, kdy byla použila kovová lithiová anoda, lithium vodivý polymerní elektrolyt gelového typu a uhlíková kompozitní elektroda s katalyzátorem. Tento typ baterie se od těch lithium iontových liší v katodě, která má porézní strukturu a je často vyrobena z uhlíku a slouží jen jako nosič pro vzduch [57]. Při vybíjení této baterie dochází k oxidaci lithia na anodě, kdy během tohoto procesu se uvolňují elektrony a lithium je postupně rozpouštěno v elektrolytu. Elektrony se poté vrací na katodu, kde dochází k reakci s kyslíkem. Nabíjecí proces probíhá jen v opačném směru, a to tak, že rozpuštěné lithium v elektrolytu se regeneruje zpátky na anodu a na katodě se uvolňuje kyslík [64]. Li-vzduchové akumulátory přitahují pozornost především díky své vysoké teoretické hustotě energie, která je 6 až 10krát vyšší než u běžných Li-ion baterií s uhlíkovou anodou. Hodnota teoretické energetické hustoty činí 11 680 Wh/kg, čímž se blíží energetické hustotě benzínu (cca 13 000 Wh/kg) [56]. Výhodou Li-vzduch akumulátorů je také jejich nižší cena, díky tomu, že katoda je vyrobena z uhlíku, který je relativně levný oproti vzácným kovům na katodě v Li-ion akumulátorech. Zároveň jsou ekologicky šetrnější, protože neobsahují toxické látky, jako je například olovo nebo kadmium [58]. Každé nabíjení a vybíjení si žádá přívod kyslíku na katodu. Vzduch, který je potřeba dostat do článku, musí být čistý a suchý, což prozatím limituje použití této technologie v elektromobilech.

3.2.7 SODÍK IONTOVÉ AKUMULÁTORY

Sodík má dost podobné chemické vlastnosti jako lithium díky tomu, že leží v periodické tabulce prvků hned pod ním. Je také lépe dostupný, přičemž v zemské kůře je ho asi tisíckrát více než lithia. Díky relativní podobnosti lze využít poznatky z vývoje lithiových baterií a aplikovat je na ty sodíkové. Sodík, stejně jako lithium v baterii, slouží jako kladná elektroda. Nevýhodou je vyšší hmotnost sodíku, s kterou se pojí nižší kapacita baterie. V roce 2021 společnost CATL uvedla, že její sodík-iontová baterie dosahuje energetické hustoty 160 Wh/kg, což je v porovnání s Li-ion bateriemi relativně nízká hodnota [64]. Výhodou těchto baterií je nižší toxicita, protože neobsahují prvky jako kobalt a lithium, které v případě požáru mohou uvolňovat nežádoucí plyny do ovzduší. Zároveň je cena sodíku v porovnání s lithiem nižší, díky jeho velkému množství [65]. Zdroj [69] uvádí, že na začátku roku 2024 měla tuna uhličitanu sodného hodnotu 290 dolarů v porovnání s uhličitanem sodným, který stál více než 13000 dolarů za tunu.

3.2.8 SOLID-STATE AKUMULÁTORY

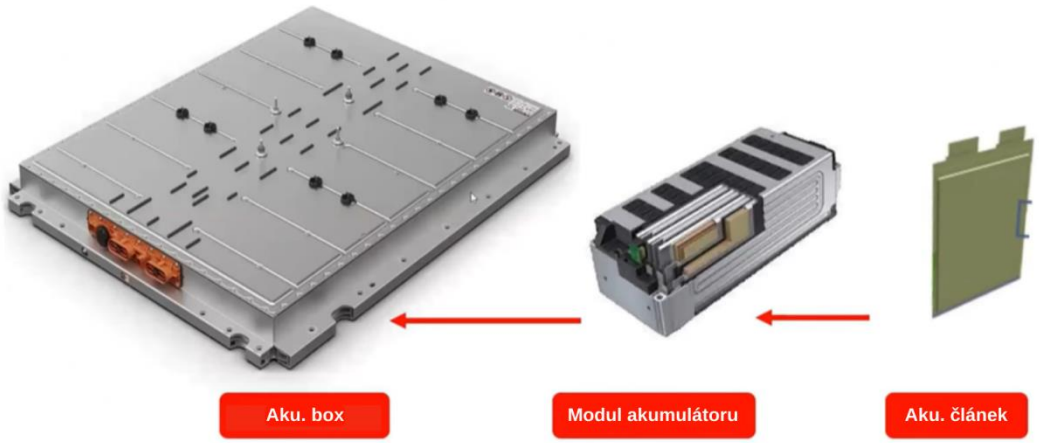
Solid-state baterie nebo také baterie s pevným elektrolytem se oproti všem ostatním bateriím liší ve formě elektrolytu, kde v předchozích typech je v kapalném skupenství a ve solid-state je v pevném. Při použití kapalného elektrolytu dochází při nabíjecím a vybíjecím cyklu baterie k tvorbě dendritů lithia a pokud dendrity dosáhnou separátoru, propíchnou jej a dojde k propojení elektrod, což vede ke zkratu a možnému vznícení článku. Tento jev je možné eliminovat použitím pevného elektrolytu. Hlavním rozdílem je mechanismus přenosu iontů, kde u běžných akumulátorů je iont transportován difuzí přes kapalný elektrolyt. Při použití pevného elektrolytu jsou tři možnosti difúze v pevné fázi. Prvním typem je vakanční difuze, kdy iont migruje na volné místo v sousedním místě, druhým je přímý intersticiální princip a třetím je korelovaný princip, kdy iont srazí sousední stabilní iont na metastabilní kationtovou stranu. Solid-state akumulátory mají potenciál lépe zvládat vyšší provozní teploty a poskytovat lepší hustotu energie a výkonu [62]. Výhoda pevných elektrolytů leží také v možnosti použití výkonnějších anodových materiálů, jako je křemík nebo lithium. Materiál na elektrolyty je na bázi sulfidů, oxidů a polymerů. Energetická hustota baterií s pevným elektrolytem se

v současnosti pohybuje okolo hodnoty 400 Wh/kg [63]. Ukázkou možného budoucího použití těchto typů akumulátorů v elektrických vozidlech ve větší míře na trhu je firma NIO a její elektromobil NIO ET7. Akumulátor elektromobilu o kapacitě 150 kWh obsahuje semi-solid-state články od firmy WeLion, jejichž energetická hustota je 360 Wh/kg [72].

3.3 ZÁKLADNÍ KONSTRUKČNÍ PRVKY AKUMULÁTORU BEV

Akumulátor BEV lze rozčlenit do následujících konstrukčních prvků, které budou dále podrobněji popsány:

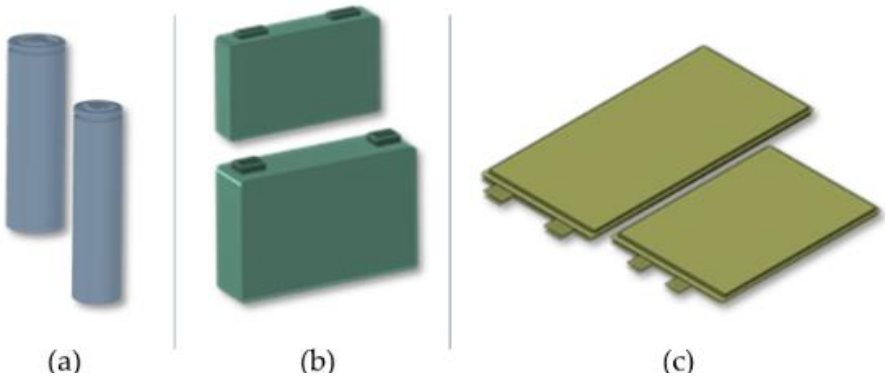
- články,
- moduly.
- akumulátorový box a BMS a
- tepelný management akumulátoru.



Obr. 7 Skladba akumulátoru: články sestavené do skupin tvoří modul a více takových modulů tvoří akumulátorový box, ve kterém jsou ještě další prvky jako BMS a prvky tepelného managementu, upravené [77]

3.3.1 AKUMULÁTOROVÉ ČLÁNKY A JEJICH VLASTNOSTI

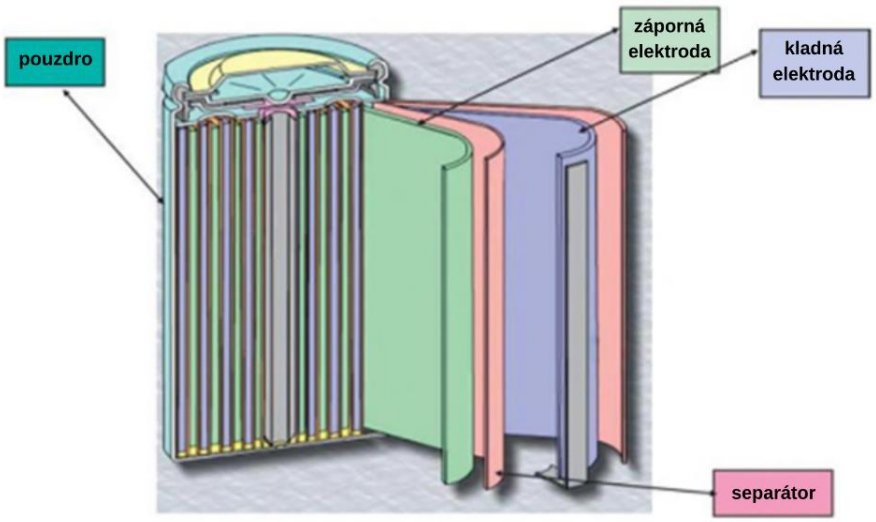
Bateriové články jsou hlavní komponentou v bateriovém systému elektromobilu a dají se rozdělit podle konstrukce na tři základní typy: cylindrický článek, sáčkový článek a prizmatický článek [10].



Obr. 8 Tři základní typy konstrukce článků: (a) cylindrický; (b) prismatický; (c) sáčkový [10]

3.3.1.1 CYLINDRICKÝ ČLÁNEK

Cylindrický článek je jedním z nejpoužívanějších typů baterie, díky jednoduché výrobě a dobré mechanické stabilitě [16]. Díky válcovému tvaru dobře odolává vnitřnímu tlaku, který vzniká při expanzi a kontrakci baterie během nabíjecího a vybíjecího cyklu. Uvnitř kovového pouzdra článku se nachází želé váleček (angl. jelly roll), navinutý kompozit sestávající z katody, anody a separátoru [8]. Přenos proudu a tepla je veden kovovými pásky z mědi nebo niklu pro kontakt s anodou a z hliníku pro kontakt s katodou.



Obr. 9 Složení cylindrického Li-ion článku, upravené [8]

Společnost Tesla se zaměřuje na využití cylindrických článků ve svých akumulátorech. Tyto články jsou klasifikovány podle svých rozměrů, přičemž nejčastěji používané typy zahrnují 18650, 21700 a nověji představený 4680. Typ 18650 se tradičně nachází v modelech Tesla Model S a X, nabízející jmenovité napětí 3,7 V a energetickou hustotu 3500 mAh [13].

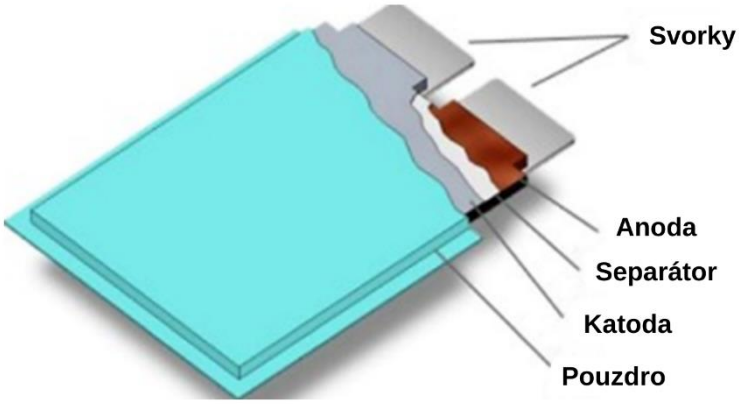
Novější typ 21700 představuje pokrok v technologii baterií, který je využíván v modelech Tesla Model 3 a Y. I přes své větší rozměry a hmotnost nabízí o 20 % vyšší energetickou hustotu než typ 18650. To umožňuje snížení počtu článků v akumulátoru o 33 % a celkové snížení hmotnosti systému o 10 % [13].

Nejnovější typ 4680 přináší revoluční konstrukční změny, zejména v uspořádání elektrod. Zatímco předchozí modely využívaly pás elektrod uvnitř článku, typ 4680 používá destičky elektrod s částečně překrývajícími se přípojnými body. Tato konstrukce umožňuje efektivnější odvod tepla, což je výhodné zejména při požadavku na maximální výkon nebo rychlé nabíjení, kdy se generuje velké množství tepla [14]. I přes zvětšení průměru článku oproti typu 21700 má typ 4680 zajistit o 16 % větší dojezd, což ukazuje na jeho vylepšenou výkonnost a účinnost [15].

3.3.1.2 SÁČKOVÝ/POUCH ČLÁNEK

Design sáčkového článku vyniká svou plochou, měkkou a tvárnou strukturou, která ho odlišuje od cylindrických variant. Pouzdro sáčkového článku je vyrobeno z laminované hliníkové fólie, což poskytuje flexibilitu oproti pevnému kovovému pouzdru. Uvnitř tohoto pouzdra jsou umístěny vrstvy anoda-separátor-katoda, které jsou na sebe pečlivě naskládány, přičemž zbytek prostoru je vyplněn elektrolytem. Zajímavým rysem sáčkových článků je, že kladné a záporné

svorky zůstávají vně pouzdra (Obr. 10), což usnadňuje připojení k elektrickému obvodu. Oproti tradičním cylindrickým článkům nemá sáčkový článek pevné kovové pouzdro, což přináší několik výhod. Například má nižší hmotnost a vyšší hustotu energie, což zvyšuje jeho efektivitu [16].



Obr. 10 Složení sáčkového článku, upravené [16]

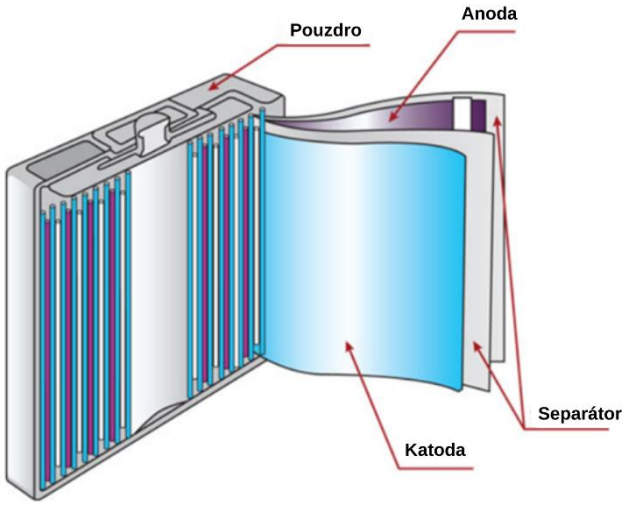
Avšak, s tímto designem přichází i různá omezení. Během nabíjecího a vybíjecího cyklu se pouzdro článku není schopné tak dobře vyrovnat s expanzí a kontrakcí od vnitřních plynů. To vede k postupnému zvětšování objemu pouzdra, což je uvnitř akumulátoru nežádoucí. K částečnému eliminování tohoto jevu se často využívá polyuretanová pěna. Tato pěna slouží jako přítlačná pružina, která udržuje rovný povrch článku, čímž se zvyšuje jeho životnost a snižuje se riziko poškození [16].

3.3.1.3 PRIZMATICKÝ ČLÁNEK

Prizmatický článek představuje další konstrukční přístup v oblasti akumulátorů, který nese několik významných výhod. Jedná se o kovový nebo plastový kvádr, který buď obsahuje elektrodové listy (anoda-separátor-katoda) navrstvené na sebe jako sáčkový typ, anebo srolované a zploštělé jako cylindrický článek. Tento design umožňuje efektivní využití prostoru v bateriovém bloku díky svému kvádrovitému tvaru, což přispívá k optimalizaci vnitřního uspořádání. Navíc má prizmatický článek v porovnání s cylindrickými články nižší energetickou hustotu, což je způsobeno silnější stěnou pouzdra [16].

Jednou z výhod této konstrukce článku je efektivnější výměna tepla mezi článkem a chladicí kapalinou. Tento faktor je zásadní pro zachování optimální teploty baterie a zajištění maximálního výkonu a životnosti. Současně s tím, podobně jako u cylindrických článků, i prizmatické články obsahují bezpečnostní prvky, jako jsou tepelné pojistky a otvory pro odvětrávání plynu, což přispívá k bezpečnému provozu a prevenci možných nežádoucích událostí [17].

Díky své kompaktní konstrukci se bateriový systém s prizmatickými články ukazuje jako ideální volba pro těžká elektrická vozidla, jako jsou autobusy nebo nákladní automobily. Montáž pod podvozkem umožňuje snížení těžiště vozidla a přispívá k lepší stabilitě a ovladatelnosti [12].

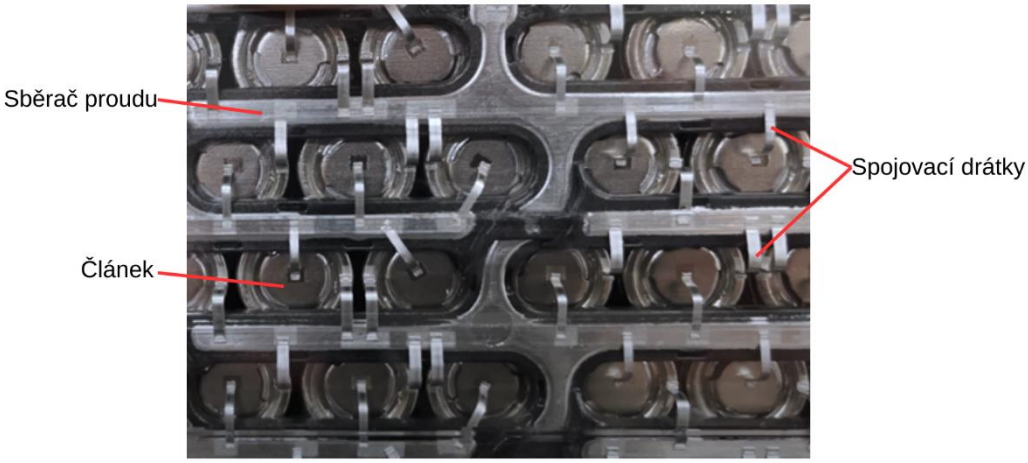


Obr. 11 Složení prizmatického článku, upravené [20]

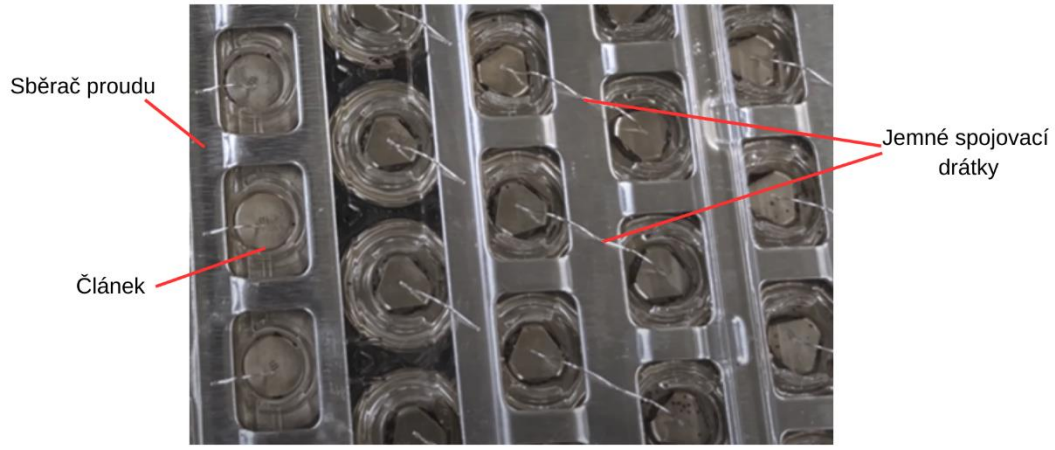
3.3.2 BATERIOVÝ MODUL

Bateriový modul je tvořen skupinou článků, které jsou mezi sebou sériově nebo paralelně propojeny. V případě paralelního zapojení jsou články propojeny tak, že všechny články v dané skupině mají stejné napětí, ale proud je roven součtu proudů jednotlivých článků. Tento způsob zapojení umožňuje zvýšení kapacity a výkonu bateriového modulu. Naopak u sériového zapojení se napětí článků sčítá, zatímco proud zůstává stejný v celém obvodu. To má za následek zvýšení celkového výstupního napětí bateriového modulu [8].

Při pohledu na konkrétní implementaci spojení článků se sběračem proudu lze vidět, že existují různé způsoby. Na Obr. 12 jsou články připojeny ke sběrači proudu pomocí krátkých, vcelku širokých drátů, zatímco Obr. 13 ukazuje spojení pomocí jemných drátků. Obě tyto varianty spojení fungují i jako pojistky. Nevýhoda těchto variant je křehkost drátů a riziko vzniku poruchy [18].



Obr. 12 Detail spojení cylindrických článků se sběračem proudu modulu pomocí jemných drátků u akumulátoru vozidla Tesla Model S, upravené [18]



Obr. 13 Detail spojení cylindrických článků se sběračem proudu modulu pomocí jemných drátků u akumulátoru vozidla Tesla Model S, upravené [18]

Pro řešení těchto problémů některé společnosti, jako například Tesla ve svých modelech Tesla Model S a X, používají pokročilejší technologie spojování, jako jsou laserem svařované kontakty mezi článkem a sběračem proudu, jak je znázorněno na Obr. 14. Tento přístup kombinuje nízký odpor spoje s odolností proti mechanickému poškození, což zvyšuje spolehlivost a životnost bateriových modulů [18].

Obr. 14 Laserem svařovaný kontakt mezi článkem a sběračem proudu modulu u nejnovějších modelů Tesla Model S a X, upravené [18]

3.3.3 AKUMULÁTOROVÝ BOX

Akumulátorový box (angl. Battery pack) je složen z modulů, které jsou tvořeny skupinami článků. Mimo to obsahuje řídící jednotku (angl. Battery Management Systém; BMS), která se stará o správnou a efektivní funkci celého systému. Kromě toho box funguje jako ochrana bateriových článků před mechanickým poškozením, vibracemi a dalšími vnějšími vlivy [8].

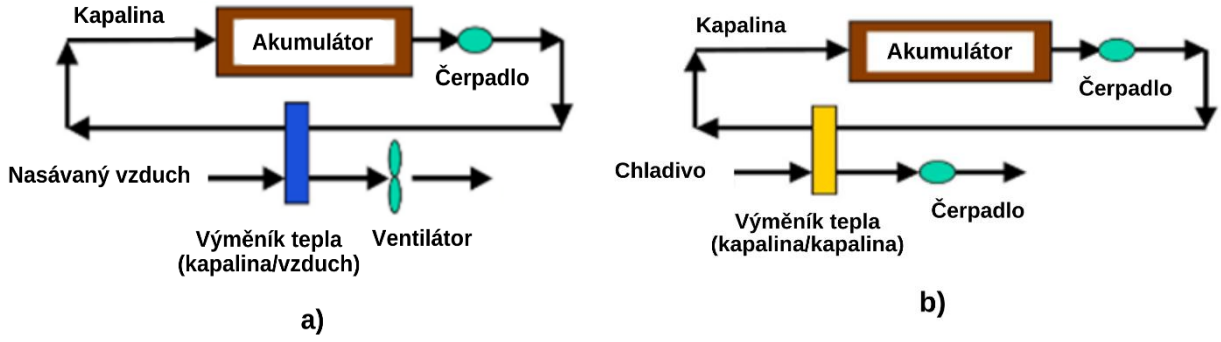
BMS monitoruje teplotu a napětí na článcích. Skupiny propojených článků se nechovají jako jeden velký článek. Jejich stav nabití a vybití je u každé skupiny individuální, což ovlivňuje jejich průběhu životnosti. To znamená, že každý cyklus nabíjení a vybíjení působí jinak na jednotlivé článkové skupiny, a to se projeví především ve změně napětí během užívání. Většinou je jeden hlavní BMS, který dostává informace od BMS z každého modulu a shromažďuje je tak, aby věděl, kdy má provést vyvážení celého systému. Díky těmto krokům se razantně prodlužuje životnost baterie. BMS má také funkci odpojení a připojení bateriového bloku k nebo od vozidla. Existuje ještě další typ BMS tzv. špagetový, kde všechna elektronika vede do jedné hlavní řídící jednotky a ta se stará o fungování celého bloku [18].

Obr. 15 Battery pack z Tesla Model 3 a Y [18]

3.3.4 TEPELNÝ MANAGEMENT AKUMULÁTORU

Chladicí systém je nedílnou součástí akumulátoru, protože při nabíjení a vybíjení dochází k uvolňování velkého množství tepla, které je nutné z akumulátoru odvádět pro zachování jeho správné funkce. Někdy je nutné teplo přivádět, například při velmi nízkých teplotách se musí akumulátor předehřát, aby mohl správně fungovat. Provozní rozsah teplot bateriových článku je vcelku úzký a je dobré ho nepřekročit, aby bylo možné dosáhnout maximálního výkonu a životnosti [19]. Teplo je možné přenášet pomocí konvekce nebo kondukce a jako teplonosné médium se využívá buď vzduch, kapalina nebo chladivo. Chlazení vzduchem není příliš efektivní, kvůli jeho nízké měrné tepelné kapacitě, která je v porovnání s vodou čtyřikrát menší. Proto se v elektromobilech jako chladící médium používá především kapalina na bázi chladiva [35].

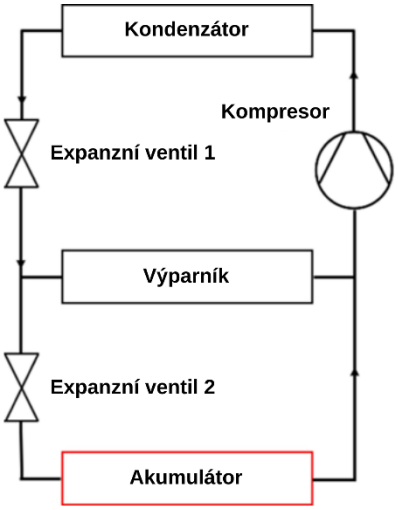
Chladicí systém lze rozdělit na aktivní a pasivní chlazení. V pasivním chlazení (Obr. 16(a)) je teplo z baterie odebíráno pomocí chladicí kapaliny, která je poté ochlazována nasátým vzduchem. Teplota přiváděného vzduchu by se měla pohybovat v rozmezí teplot 10 až 35 °C, aby nedocházelo k přehřátí nebo podchlazení akumulátoru. Vzhledem k nízké tepelné vodivosti vzduchu a tím nízké účinnosti chlazení se přešlo na systém aktivního chlazení. Tento systém využívá výměník tepla na principu kapalina/kapalina, kde chladicí médium s absorbovaným teplem z akumulátoru předává teplo druhé kapalině s nižší teplotou [25].



Obr. 16 Systém pasivního (a) a aktivního (b) chlazení, upravené [25]

Chladicí systém se dá ještě rozdělit na přímé a nepřímé chlazení, a to podle toho, jestli je baterie v přímém kontaktu s chladicí kapalinou nebo nikoliv. Při přímém chlazení je použita chladicí kapalina na bázi oleje, a to buď silikonový nebo minerální. Obecně je tento typ kompaktnější a jednodušší na konstrukci, což může ušetřit náklady na výrobu. Na druhou stranu tyto oleje jako chladicí médium mají vyšší viskozitu, a tak je nutný větší výkon čerpadla než při nepřímém chlazení. Právě v nepřímém chlazení je chladicí kapalina vedena v kanálcích, a tak není v přímém styku s akumulátorovými články. Zde se nejčastěji používá chladivo jako směs vody a glykolu anebo určitá forma kapalných kovů [25].

Dále existují chladicí systémy na bázi stlačování par za pomocí speciálního výparníku. Velká výhoda oproti ostatním chladicím systémům je vysoká účinnost výměny tepla, díky tomu, že je tato výměna dvoufázová (v kapalném i plynném skupenství). Tento princip je efektivnější kvůli vyššímu konvekčnímu součiniteli přestupu tepla ve srovnání s kapalinami nebo jenom plyny. Tento systém obsahuje výměník tepla a paralelně k němu je umístěný výparník (Obr. 17). Ve vozidlech je nutné, aby tento systém byl schopen i ohřívat akumulátory, a proto jsou do systému zakomponovány potrubní sítě s expanzními ventily [36].

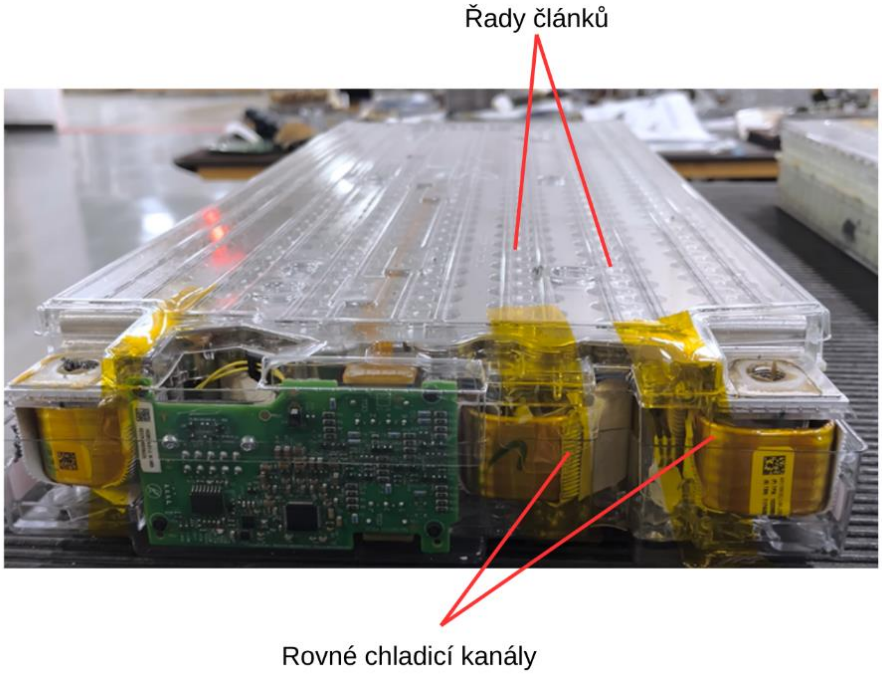


Obr. 17 Základní schéma tepelného managementu na bázi kompresního parního cyklu, upravené [36]

Existuje také tepelný management vozidla na bázi materiálů s fázovou přeměnou. Tyto materiály se používají jako zásobníky tepelné energie, kde využívají fázový přechod z pevné látky na kapalinu nebo z kapaliny na páru. Rozsah teplot, ve kterých mohou operovat, je od skladování energie za studena (cca -50 °C) až po teploty vyšší 120 °C. Velká výhoda tohoto

systému je, že k jeho provozu nevyžaduje žádnou další elektrickou energii, takže se jedná o tzv. pasivní systém. Důsledek použití tohoto systému může být ve snížení energetické náročnosti elektromobilu [36].

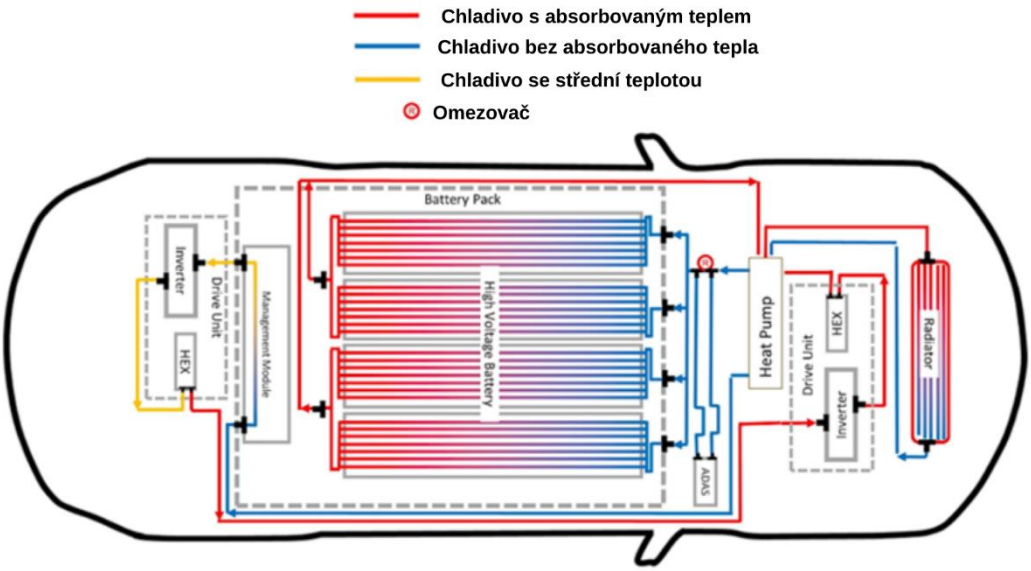
U Tesla Model S a X bylo chlazení prvně řešeno pomocí rovného kanálu, který se nachází v mezeře mezi dvěma řadami článků (Obr. 18). U nového designu chladicího systému je chladicí kanál veden mezi články (Obr. 19), čímž se dosáhne většího styku chladicí kapaliny s boční plochou článku a tím pádem lepšímu odvodu tepla [18].



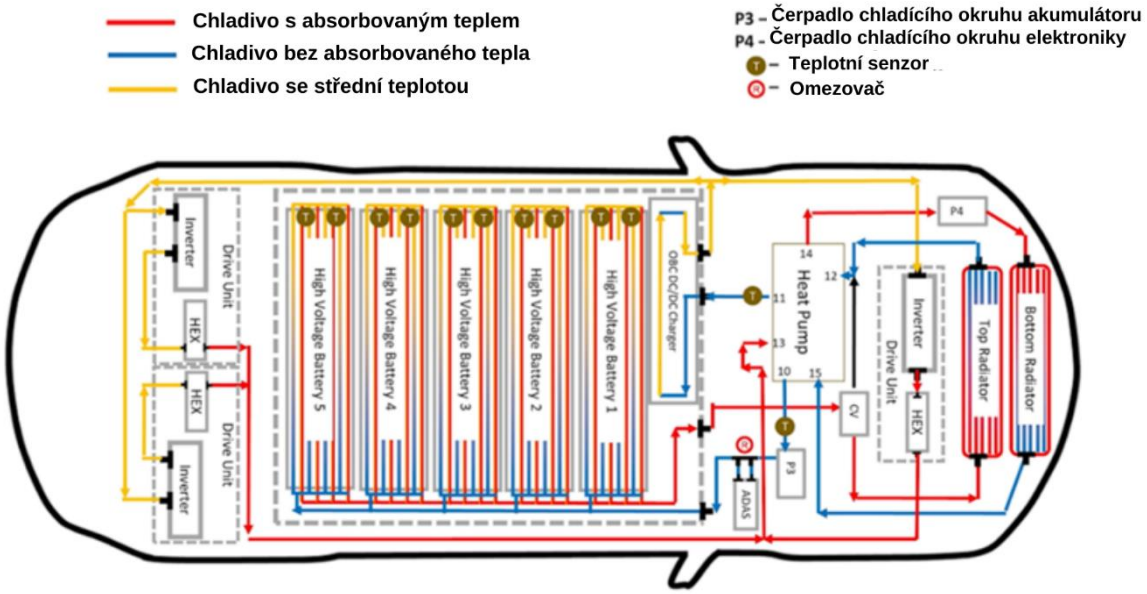
Obr. 18 Pohled na akumulátor z Tesla Model S a X s rovnými chladicími kanály mezi řádkami článků, upravené [18]

Obr. 19 Akumulátor z Tesla Model Y s chladicím kanálem vedeným mezi články, upravené [18]

Zprvu byl přívod chladicí kapaliny u modelů Tesla řešen tak, že na jedné straně modulu byl vstup a na druhé straně výstup (Obr. 20). To znamenalo, že články u vstupu byly více chlazeny než na výstupní straně, což z dlouhodobého hlediska není vhodné, jelikož články na výstupu budou mít kratší životnost, protože chladicí kapalina už bude ohřátá o odebrané teplo z článků u vstupu. Pro vyřešení nerovnoměrného teplotního gradientu v modulu přišla Tesla s designem, kde vstup a výstup chladicí kapaliny je na stejné straně, a to má za následek rovnoměrné ochlazování článků a tím pádem jejich delší životnost (Obr. 21).



Obr. 20 Schéma chladícího systému vozidla Tesla Model Y 2020, upravené [18]



Obr. 21 Schéma chladícího systému vozidla Tesla Model S Plaid 2022, upravené [18]

3.4 DEGRADACE AKUMULÁTORŮ

Akumulátory v elektromobilech jsou navrženy tak, aby vydržely po celou dobu životnosti vozidla, avšak s časem jejich kapacita klesá, což má za následek snížení dojezdu, výkonu a celkové účinnosti. Degradaci baterie ovlivňuje mnoho faktorů přes styl jízdy, způsob nabíjení, skladování až po environmentální faktory. Obecně akumulátoru nesvědčí náhlý požadavek na plný výkon nebo opakované vybíjení baterie na hodnotu blížící se nulovému dojezdu. Časté používání rychlého nabíjení DCFC (DC Fast Charging) také negativně ovlivňuje životnost baterie. V neposlední řadě provoz elektromobilu v extrémních teplotách výrazně ovlivňuje výkonnost baterie. Například při nízkých teplotách, kdy je potřeba topit v interiéru vozu. Kvůli tomu může dojezd vozu klesnout až o 40 % [51].

Životnost baterie se udává ve dvou vzájemně závislých ukazatelích. Prvním je tzv. kalendářní životnost určující předpokládaný počet let životnosti baterie a druhým je cyklická životnost označující počet maximálních cyklů nabíjení a vybíjení, kterým je baterie vystavena, než dosáhne hranice ztráty kapacity. Výše zmíněné faktory přímo přispívají k degradačním mechanismům, jako je například strukturální rozklad kladné elektrody, tvorba vrstev mezifáze pevného elektrolytu nebo lámání částic záporné elektrody [52].

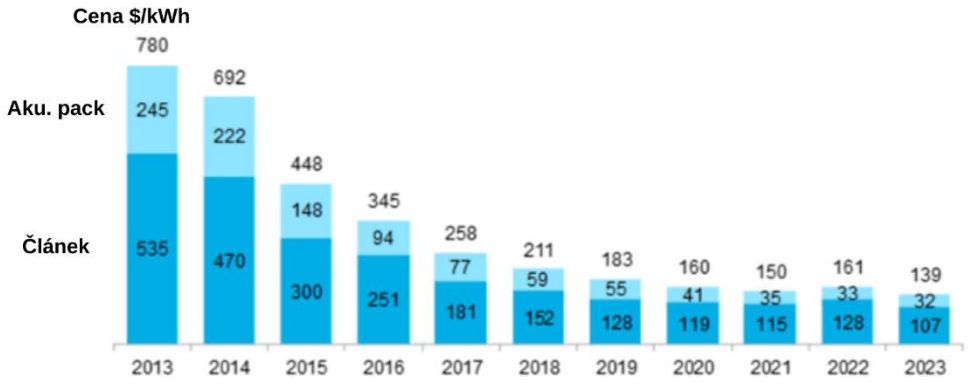
Zdroj [53] ukazuje pokles kapacit u různých elektromobilů značky Tesla v závislosti na ujetých kilometrech. U Tesla Model 3 Long Range po 80 tisících km klesla kapacita baterie z 74 kWh na 69 kWh a po 160 tisících km na hodnotu 67 kWh, což je pokles o 9,5 % oproti původní kapacitě. Tato data jsou sesbírána pro model z roku 2018. Pro stejný typ elektromobilu ale z roku 2022 je vidět změna trendu v datech skrz použití dvou různých typů akumulátorových článků. Jeden model používá baterii od firmy LGChem, kde kapacita baterie klesla o 6 % po cca 160 tisících km, kdežto druhý typ využívá baterii od firmy Panasonic, kde trend poklesu byl větší, a to o 11 % po stejném počtu ujetých km. Data pro Tesla Model 3 Standard Range vykazují o něco nižší pokles kapacity baterie. V průběhu let 2019 až 2023 se pro tento model elektromobilu pohybovaly hodnoty poklesu kapacity v rozmezí od 3 % do 5 % oproti původní kapacitě po cca 80 tisících km. Nejnižší pokles kapacity baterie z 57 kWh na 56 kWh po 80 tisících km je u dat z roku 2021, kde jsou použity LFP články. U Tesla Model S/X 2021+ je pokles kapacity baterie mnohem razantnější, a to až o 11 % po 80 tisících km. Baterie degraduje vcelku rychle v brzké fázi životnosti a poté pokles kapacity baterie není tak rapidní ve zbývajícím provozním cyklu. Obecně lze říci, že jako nejhorší z pohledu uchovávání kapacity v průběhu životnosti se jeví ty největší baterie v nejvýkonnějších elektromobilech, protože jsou pod největším zatížením.

3.5 CENA AKUMULÁTORŮ

Nejdražší částí elektromobilu je bezpochyby jeho akumulátor, který může tvořit až polovinu celkové ceny vozidla. Výrobci většinou udávají záruku na baterii v podobě 8 let nebo cca 160 tisíc najetých km a zavazují se k nejméně 70% kapacitě. Po uplynutí této doby si majitel vozu případnou výměnu musí hradit sám, ale jak uvádí zdroj [54] baterie v elektromobilech se zdají více odolné, než sami výrobci počítali. Výměna baterie je tedy celkem vzácná, a to také dokládají údaje ze zdroje [55], kde z 15 tisíc uživatelů EV, muselo výměnu řešit jen 1,5 % z nich. Pokud už na výměnu dojde, mění se pouze nefunkční moduly akumulátoru, a ne celý akumulátor. Zdroj [54] uvádí ceny akumulátorů pro různé typy elektromobilů. Například cena za novou baterii v BMW i3 vyjde zhruba na 363 tis. Kč, u Tesla Model S je tato cena skoro 500 tis. Kč a nová baterie pro Mercedes-Benz EQC stojí až 720 tis. Kč. Je nutné zmínit, že takto vysoké ceny se týkají celých akumulátorů jako náhradních dílů a jejich ceny jsou vysoké stejně

jako u specifických náhradních dílů vozidel se spalovacím motorem (např. cena náhradního motoru 1.4 TSi 110 kW, VW Passat je 103 tis. Kč) [73], ale i tak celková cena podtrhuje fakt, že akumulátor je nejdražší částí elektromobilu.

Z pohledu výrobců došlo v posledních letech k dramatickému snížení cen samotných článků pro výrobu akumulátorů. Jak uvádí Bloomberg BNEF [74], v roce 2013 byla cena Li-ion článků na trhu 535 $ za kWh a roce 2023 stály Li-ion články 107 $ za kWh. Vývoj ceny na trhu pro celý akumulátorový box kopíruje Li-ion články, kdy v roce 2013 si za něj automobilové firmy účtovaly 245 $ za kWh a v roce 2023 se tato cena pohybovala okolo 32 $ za kWh.



Obr. 22 Vývoj ceny Li-ion akumulátorového boxu a článků v průběhu let 2013 až 2023, upravené [74]

4 ENERGETICKÁ NÁROČNOST VÝROBY AKUMULÁTORŮ A JEJÍ EMISNÍ STOPA

Elektromobily jsou často vnímány jako ekologicky šetrnější a udržitelnější alternativa k vozům se spalovacími motory. Tento náhled na věc vychází ze skutečnosti, že provoz elektromobilů produkuje nulové emise, což je velice přínosné například ve velkých městech, kde to může mít za následek zlepšení ovzduší. Nicméně, aby bylo možné posoudit ekologický dopad elektromobilů, je nezbytné podívat se na celý jejich životní cyklus. Zvláště důležitou částí životního cyklu z hlediska energetické náročnosti je výrobní fáze. V případě elektromobilu je kritickou částí výroba akumulátoru, která je z celého vozidla energeticky nejnáročnější [74].

Tato část práce se zaměřuje na první fázi životního cyklu akumulátoru (koncept od kolébky k bráně, angl. cradle-to-gate), která zahrnuje těžbu nerostných surovin, přípravu materiálu, samotnou výrobu akumulátorů a jeho montáž. Především budou analyzovány Li-iontové akumulátory, hlavně ty s NMC a LFP katodou, protože v roce 2022 NMC akumulátory tvořily 60 % podílu na trhu následované LFP akumulátory s 30 % tržního podílu [79]. Přesněji budou shromážděny podrobné informace o energetické náročnosti výroby a o vyprodukovaných emisích skleníkových plynů v této fázi životního cyklu. Dále budou shrnuty data o materiálovém složení akumulátorů. Informace budou získány především z již provedených LCA studií, které analyzovaly kategorie dopadů potřebné pro tuto práci, tedy energetickou náročnost (CED) a potenciál globálního oteplování (Global Warming Potential; GWP), který sleduje množství emisí skleníkových plynů. GWP porovnává dopady různých plynů na životní prostředí (kolik energie pohltí emise 1 tuny plynu ve srovnání s emisemi 1 tuny CO_2 za určité časové období) [26].

4.1 CRADLE-TO-GATE ANALÝZY NMC-C AKUMULÁTORŮ

Čínská studie [75] analyzuje 72,5kWh akumulátor s NMC články, přesněji NMC622 (60 % niklu a po 20 % manganu a kobaltu), o celkové hmotnosti 630 kg. Energetická hustota článků je 180 Wh/kg a celého akumulátorového packu 115 Wh/kg. Pro materiály na katodu a anodu, které tvoří největší část akumulátoru z hlediska hmotnosti (42 %), byla data získána od dvou předních výrobců katodových materiálů v roce 2018 v Číně, kteří zároveň patří mezi pět největších dodavatelů NMC článků na světě. Údaje o ostatních materiálech byly doplněny z modelu ANL GREET, 2018 (Greenhouse Gases, Regulated Emissions and Energy Use in Transportation) a z databáze životního cyklu automobilů v Číně (CALCD 2018). Tab. 1 zobrazuje materiálové složení zkoumaného akumulátoru.

Tab. 1 Materiálové složení 72,5kWh NMC622 akumulátoru, upravené [75]

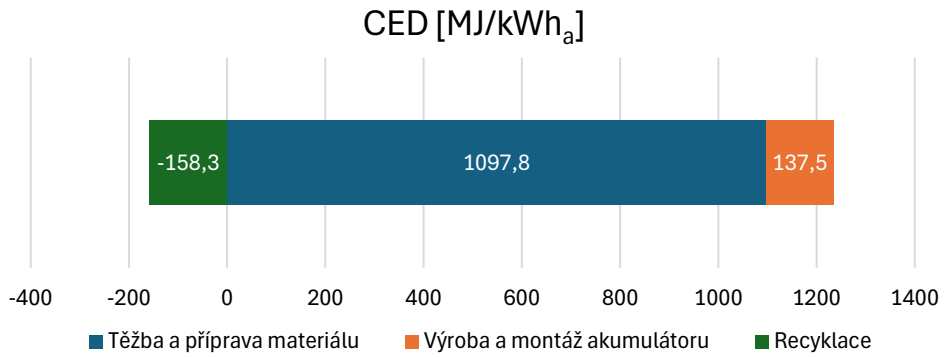
Materiál	Hmotnost [kg]	Použití materiálu
NMC622	168,3	katoda
Grafit	96,2	anoda
Polyvinylidenefluorid (PVDF)	12,0	články
Měď	54,1	články
Hliník	145,1	18,1 % články, 4,9 % komponenty aku.
LiPF6	7,2	elektrolyt
Ethylenkarbonát (EC)	75,2	elektrolyt
Dimethylkarbonát (DMC)	34,3	elektrolyt
Polypropylen	9,6	elektrolyt
Ocel	6,3	akumulátorové komponenty
Tepelná izolace	1,9	akumulátorové komponenty
Glycol	10,1	chladivo
Elektronika	9,5	akumulátorové komponenty
Celkem	629,8	-

Z pohledu spotřebované energie na výrobní procesy se na vyrobení 1 kWh článku spotřebuje 20 kWh elektřiny a 9,5 kWh páry. Největší podíl na celkové energetické náročnosti výrobních procesů má vakuové sušení (42 %) následované procesem povlakování a sušení (38 %). Spotřeba energie jednotlivých výrobních procesů je představena v tabulce (Tab. 2) a tato data jsou vyhotovena na základě databáze CALCD 2018 s uvažováním čínského energetického mixu.

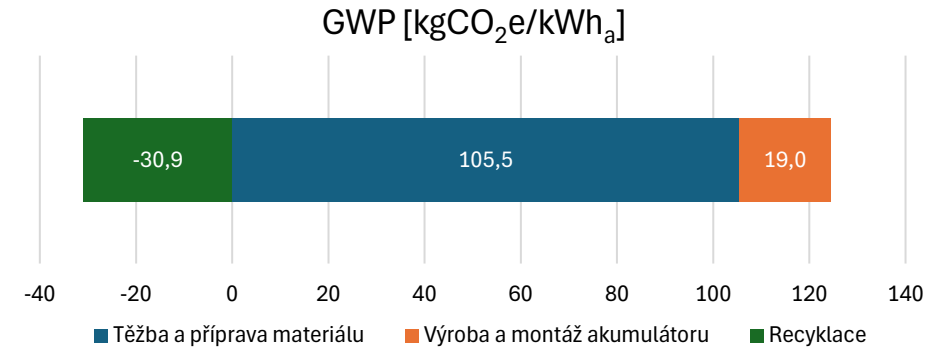
Tab. 2 Spotřeba elektrické energie, páry a vody na výrobu 1 kWh NMC622 akumulátoru, upravené [75]

	Míchání	Povlakování a sušení	Vakuové sušení	Formování	Montáž	Celkem
Elektřina [kWh_e/kWh_a]	1,0	7,0	8,0	3,0	1,0	10,0
Pára [kWh_p/kWh_a]	-	4,7	4,8	-	-	9,5
Voda [kg/kWh]	33,9	-	-	-	-	33,9

Výsledek LCA studie ukazuje, že fáze přípravy materiálu je hlavním přispěvatelem z hlediska spotřebované energie. Samotná výroba článků zahrnuje jen 12,8 % celkové energetické náročnosti. Podobně to platí i pro emise skleníkových plynů, kde výrobní část zabírá 20 % z celkového GWP. Autoři se v této studii také zabývali recyklací akumulátoru po jeho životnosti. Údaje o recyklaci získali na základě šetření ve dvou velkých čínských společnostech zabývajících se recyklací odpadních baterií a vzácných kovů. Výsledky ukazují, že recyklace materiálů může snížit energetickou náročnost o 14,7 % a potenciál globálního oteplování dokonce o 23 %. Celková spotřeba energie se zahrnutím recyklace činí 1077 MJ/kWh_a a celková produkce emisí 93,6 $kgCO_2e/kWh_a$. Přesné hodnoty CED a GWP pro jednotlivé fáze jsou zobrazeny Obr. 24, respektive Obr. 23. Studie také uvádí, že největší podíl na kategorie dopadů CED a GWP má výroba katody a anody. Dohromady mají podíl skoro na 50 % z celkových hodnot u obou ukazatelů.



Obr. 24 CED jednotlivých fázi výroby na 1 kWh NMC622 akumulátoru, upravené [75]



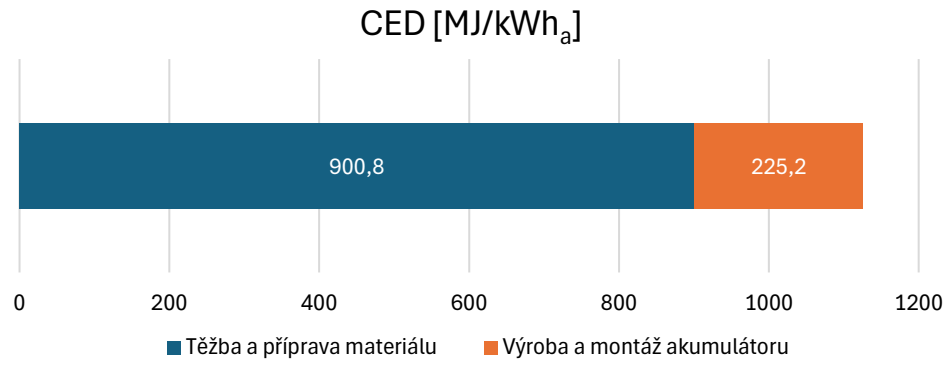
Obr. 23 GWP jednotlivých fázi výroby na 1 kWh NMC622 akumulátoru, upravené [75]

Studie [80] analyzuje akumulátor s NMC111 katodou o kapacitě 23,5 kWh a hmotnosti 165 kg. Dohromady obsahuje 140 prizmatických článků s jejich energetickou hustotou 197 Wh/kg a energetická hustota celého akumulátorového boxu je 143 Wh/kg. Podrobné materiálové složení je uvedené v Tab. 3 a vychází z modelu BatPac (Argonne's Battery Performance and Cost Model).

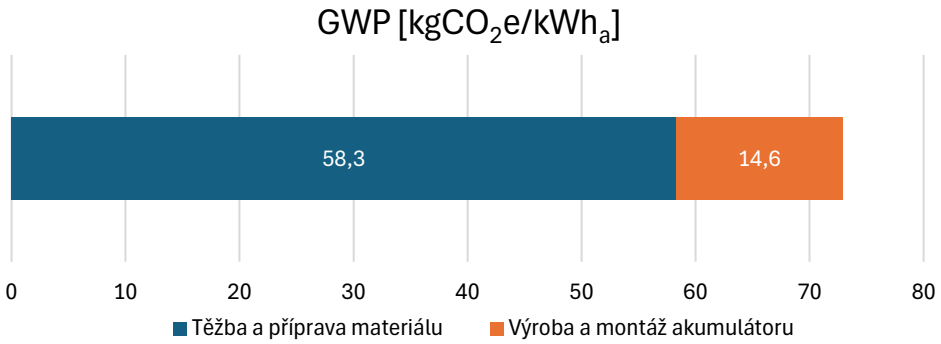
Tab. 3 Materiálové složení 23,5kWh NMC111 akumulátoru, upravené [80]

Materiál	Hmotnost [kg]	Použití materiálu
NMC111	41,5	katoda
Grafit	23,2	anoda
Uhlíková čerň	2,8	katoda
PVDF	3,6	katoda, anoda
Měď	19,4	články, aku. komponenty
Hliník	39,6	katoda, pouzdro článku, aku. komponenty
LiPF6, EC, DMC	17,5	elektrolyt
Plast	2,8	separátor, aku. komponenty
Ocel	1,0	články
Tepelná izolace	0,8	akumulátorové komponenty
Glykol a voda	7,1	chladivo
Elektronika	6,0	akumulátorové komponenty
Celkem	165,3	-

Obr. 25 ukazuje zastoupení těžby materiálu a výroby akumulátoru na celkové spotřebě energie na 1 kWh, která činí 1126,0 MJ. Samotná výroba článků zastává jen 20 % z celkové spotřeby energie. Výsledek pro kategorii dopadu GWP kopíruje rozložení CED. Celková hodnota GWP je 72,9 $kgCO_2e/kWh_a$ (Obr. 26) a většina (80 %) se vyprodukuje při těžbě a přípravě materiálu.



Obr. 25 CED jednotlivých fází výroby na 1 kWh NMC111 akumulátoru, upravené [80]

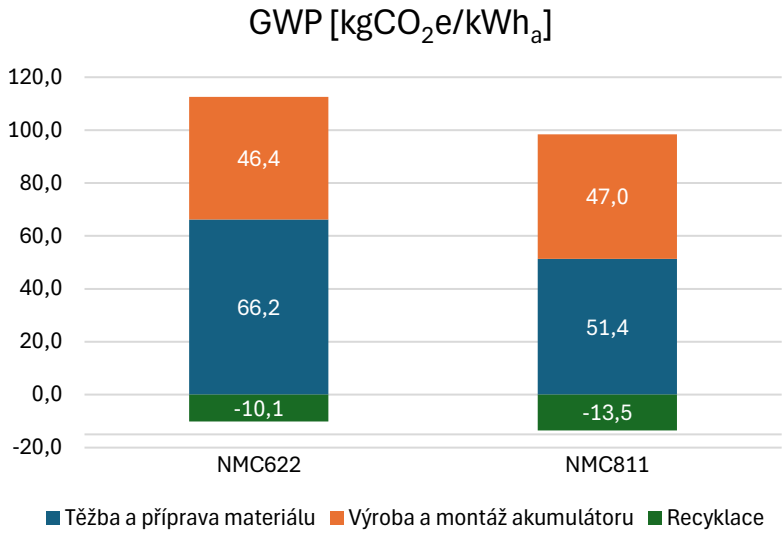


Obr. 26 GWP jednotlivých fází výroby na 1 kWh NMC111 akumulátoru, upravené [80]

Tato studie neuvádí přesnou energetickou náročnost na jednotlivé výrobní procesy, ale uvádí hodnotu 170 MJ/kWh vyrobeného článku, z čehož 8,3 kWh tvoří elektrická energie a 38,9 kWh pára. Studie uvažuje výrobu akumulátoru v USA, kde podle modelu GREET 2018 je energetický mix sítě tvořen z 32,7 % uhlím, 29,8 % zemním plynem, 20,6 % jadernou energií, 7,7 % vodní energií, 6,4 % větrnou energií a 2,7 % jiným zdrojem.

Studie [83] zkoumala dopad na životní prostředí 100kWh NMC akumulátoru o celkové váze 790 kg. Pro zjištění kategorií dopadů byla použita midpointová metoda ReCiPe. Vstupní data pro akumulátor použili autoři z předešlých studií a uvažují evropský elektrický mix, který přebrali z databáze Ecoinvent 3.3. Autoři v této práci přesně nespecifikují, kolik energie bylo spotřebováno na přípravu materiálu a poté výrobu akumulátoru, jen uvádí celkovou hodnotu energetické náročnosti. Pracují zde s hodnotou pohybující se v rozmezí 813,7 MJ/kWh_a až 3207,4 MJ/kWh_a. Spodní hodnota energetické náročnosti je při plném zatížení výrobního závodu a horní při nízkém zatížení. Při uvažování energetické náročnosti 813,7 MJ/kWh_a se vyprodukuje 127 $kgCO_2e/kWh_a$.

Studie [91] provedla LCA analýzu na NMC811 akumulátor s kapacitou 28,1 kWh, hmotností 149,2 kg a energetickou hustotou 154 Wh/kg a zároveň na NMC622 akumulátor s kapacitou 28 kWh, hmotností 161,3 kg a energetickou hustotou 149 Wh/kg. Vstupní data pro NMC622 jsou převzata ze studie [75] a pro NMC811 z předešlých studií a doplněné z databáze Ecoinvent 3.0. Pro zjištění dopadů na životní prostředí tato studie používá midpointovou metodu CML-IA, která mezi kategorii dopadů nezahrnuje celkovou spotřebovanou energii. Studie tedy zmiňuje jen energetickou náročnost výroby samotného akumulátoru. Na výrobu NMC622 akumulátoru je potřeba 232,7 MJ/kWh$_a$ energie a na NMC811 akumulátor to je 226,4 MJ/kWh$_a$. Emise skleníkových plynů jsou v této studii uvedeny pro celou výrobní fázi životního cyklu. Celková hodnota GWP i s uvažováním recyklace činí pro NMC622 akumulátor 102,5 kgCO$_2$e/kWh$_a$ a pro NMC811 84,9 kgCO$_2$e/kWh$_a$. Emisní stopa jednotlivých fází výroby akumulátorů je znázorněna na Obr. 27.



Obr. 27 GWP pro jednotlivé výrobní fáze životního cyklu na 1 kWh NMC622 a NMC811 akumulátoru, upravené [91]

Studie [92] analyzuje 27kWh NMC111 akumulátor o celkové hmotnosti 188,7 kg. Tato studie používá model GREET ke stanovení vlivu výroby akumulátoru na energetické a environmentální dopady na životní prostředí. Tedy přesněji jde o model, který se používá k výpočtu spotřeby energie a emisí spojených s výrobou paliv a materiálů. Materiálové složení akumulátoru vychází z modelu BatPac a je stejné, jak ve zdroji [80], jen upravené na hmotnost zkoumaného akumulátoru. V této studii není detailně řečeno, kolik energie se spotřebovalo na jednotlivé části výrobního procesu, ale je uvedena celková energetická náročnost 1157,4 MJ/kWh$_a$. Je však zmíněno, že více než 1/3 celkové energetické náročnosti je potřeba na přípravu materiálu pro výrobu katody. Celková produkce emisí skleníkových plynů spojená s výrobní fází akumulátoru ukazuje hodnotu 74,0 kgCO$_2$e/kWh$_a$.

Další hodnoty energetické náročnosti a emisí skleníkových plynů výrobní fáze životního cyklu NMC akumulátorů byly převzaty ze souhrnné studie [82]. Studie [84], ve které byl zkoumán 46,8kWh NMC333 akumulátor o hmotnosti 329,1 kg, uvádí hodnotu CED 736,6 MJ/kWh$_a$ a GWP 92,3 kgCO$_2$e/kWh$_a$. Hodnoty CED a GWP pro 51kWh NMC akumulátor s hmotností 458 kg ze studie [85] jsou 958,6 MJ/kWh$_a$ a 180,8 kgCO$_2$e/kWh$_a$. Studie [81] zjistila hodnotu

CED 953,1 MJ/kWh$_a$ a GWP 107,7 kgCO_2e/kWh$_a$ pro 27kWh NMC akumulátor s hmotností 150,2 kg. Shrnuté studie v této kapitole byly provedeny v rozmezí let 2017 až 2023.

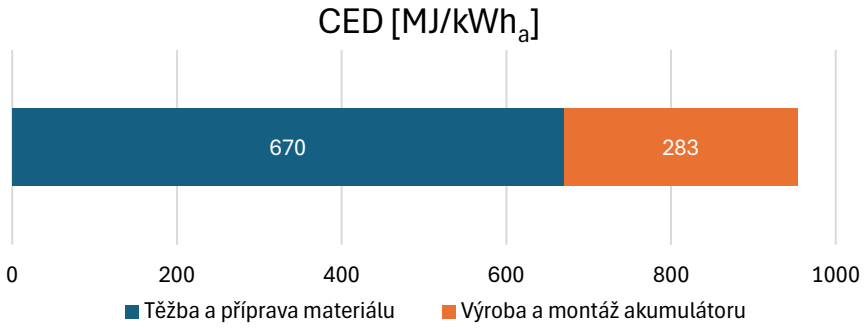
4.2 CRADLE-TO-GATE ANALÝZY LFP-C AKUMULÁTORŮ

Studie [81] analyzuje 39,4kWh LFP akumulátor skládající se z 10 modulů po 10 článcích o celkové váze 218,8 kg. Materiálové složení článku, data o těžbě, zpracování a recyklaci materiálu jsou především založeny na informacích od čínského výrobce baterií CATL a jsou doplněny informacemi z databáze GaBi6 a z předešlých studií. Materiálové složení LFP akumulátoru je uvedeno v Tab. 4.

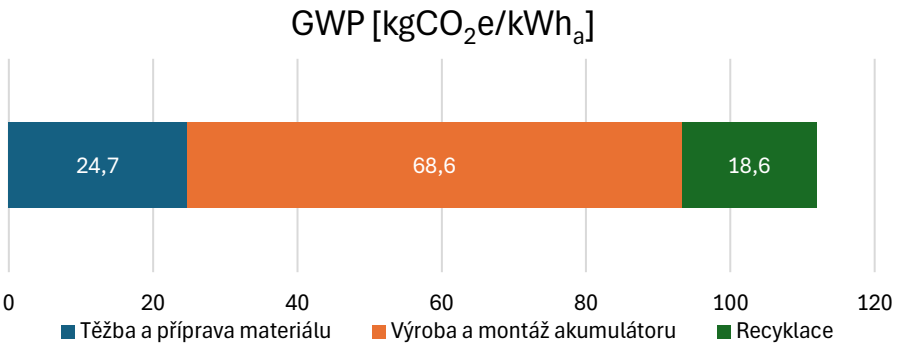
Tab. 4 Materiálové složení 39,4kWh LFP akumulátoru, upravené [81]

Komponenta	Materiál	Hmotnost [kg]
Katoda	LFP, PVDF, CB, Al	108,2
Anoda	Grafit, SBR, Cu	21,2
Eletrolyt	LiPF6, EC, EMC	44,0
Separátor	PE	3,5
Pouzdro	PP	14,0
BMS	TSTR	13,4
Obalový materiál	PP, Al	14,5
Celkem	-	218,8

Energii spotřebovanou na těžbu a zpracování materiálů tato studie neuvádí a přebírá ji proto z jiné studie [37], kde se uvádí hodnota 670 MJ/kWh. Samotný výrobní proces LFP akumulátoru podle zdroje [81] spotřebuje 2560 kWh elektrické energie a 534,7 kWh zemního plynu. Při přepočítání vychází, že výrobní část LFP akumulátoru se spotřebuje 282,9 MJ/kWh$_a$. Celková hodnota energetické náročnosti pro výrobní fázi tedy činí 952,9 MJ/kWh$_a$. Tato studie [81] uvádí i proces recyklace, který má ale pro LFP akumulátor negativní dopad na životní prostředí oproti NMC akumulátoru, který je v této studii zmíněn také. Je to odůvodněno tím, že na výrobu LFP bylo využito více surovin a energie než na NMC a zároveň se v LFP recykluje menší množství kovů než v NMC. Recyklace niklu, kobaltu a manganu má podle studie úspěšnost 99 %, poté následuje železo s 97 %, měď s 95 %, hliník s 86 % a lithium s 60 %. Energetická náročnost recyklačních procesů obnáší 549 kWh elektrické energie a 637,2 kWh zemního plynu, to znamená 108 MJ/kWh$_a$. Není zde však řečeno, jak by recyklace ovlivnila spotřebu energie v životním cyklu. Tedy kolik energie by bylo recyklací ušetřeno oproti těžbě a přípravě nového materiálu.



Obr. 28 CED výrobní fáze 39,38kWh LFP akumulátoru, upravené [81]



Obr. 29 GWP výrobní fáze 39,38kWh LFP akumulátoru, upravené [81]

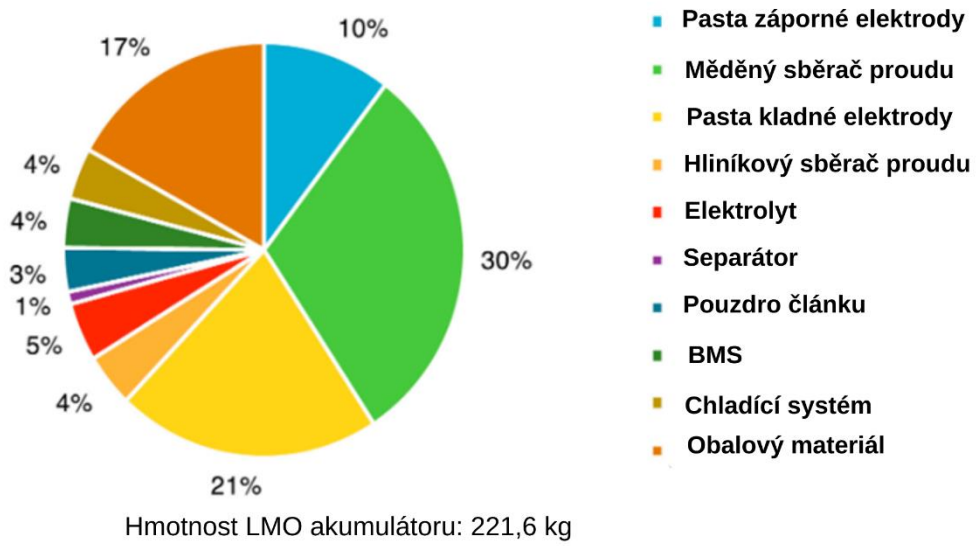
Těžba a zpracování materiálu jsou zodpovědné za 24,7 $kgCO_2e/kWh_a$, výrobní proces za 68,6 $kgCO_2e/kWh_a$ a recyklace za 18,6 $kgCO_2e/kWh_a$. Do celkového hodnoty emisí skleníkových plynů už je recyklace zahrnuta, ale má negativní dopad na životní prostředí. Celková hodnota GWP je tedy 111,9 $kgCO_2e/kWh_a$. Studie zmiňuje, že výrobní fáze je z hlediska energetické náročnosti zanedbatelná ve srovnání s fází těžby a zpracování materiálů. To potvrzují i čísla, kdy fáze těžby a zpracování materiálů je energeticky skoro třikrát náročnější. Při GWP ukazateli je to přesně naopak, ale studie tento fakt nijak nekomentuje. Autoři studie [91] zmiňují, že při fázi výroby a montáže LFP akumulátoru se spotřebuje velké množství elektrické energie a v kombinaci s čínským energetickým mixem, který je z více jak 70 % založen na uhlí, to má za následek velkou produkci emisí. Každopádně celková hodnota GWP se pohybuje v rozmezí ostatních studií, a tak je považována za relevantní.

Studie [93] zkoumala 23,5kWh LFP akumulátor o celkové hmotnosti 203,1 kg a energetické hustotě 115,8 Wh/kg. Materiálové složení tohoto akumulátoru je založeno na modelu BatPac. Základní údaje o výrobě a recyklaci pocházejí z ostatních studií a z volně dostupných zpráv o hodnocení dopadů na životní prostředí čínských společností. Bylo uvažováno, že akumulátor je vyráběn v Číně, a tedy byl použit čínský energetický mix z GaBi databáze. Studie neuvádí přesnou energetickou náročnost celé výrobní fáze akumulátoru ve formě ukazatele CED. Zmiňuje však energetickou náročnost výroby samotného akumulátoru, která je 170 MJ/kWh_a, z toho 30 MJ je elektrická energie a 140 MJ je teplo ze spalování zemního plynu. Z hlediska kategorie dopadu GWP uvádí studie hodnotu pro výrobní fázi 76,7 $kgCO_2e/kWh_a$, ale už neukazuje, za kolik je zodpovědná těžba a příprava materiálu a za kolik výroba a montáž akumulátoru.

Další hodnoty energetické náročnosti a emisí skleníkových plynů výrobní fáze životního cyklu LFP akumulátorů byly převzaty ze souhrnné studie [82]. Studie [87], ve které byl zkoumán 20kWh LFP akumulátor o hmotnosti 167 kg, uvádí hodnotu CED 1026,3 MJ/kWh_a a GWP 75 $kgCO_2e/kWh_a$. Studie [88] zjistila hodnotu CED 587,9 MJ/kWh_a, která se vztahuje pouze k energetické náročnosti výroby a montáže akumulátoru, a GWP 330,3 $kgCO_2e/kWh_a$. Autoři přesně nekomentují tuto vysokou hodnotu GWP, ale podle zkoumání by za to mohla být zodpovědná fáze transportu, která je ve studii rozebrána velmi podrobně. Hodnoty energetické náročnosti a emisí skleníkových plynů byly zjišťovány pro LFP akumulátor o kapacitě 76 kWh a hmotnosti 599 kg. Shrnuté studie v této kapitole byly provedeny v rozmezí let 2017 až 2022.

4.3 CRADLE-TO-GATE ANALÝZY LMO-C A NCA-C AKUMULÁTORŮ

Studie [22] zkoumá LMO akumulátor o kapacitě 24 kWh, který se například používá v plně elektrickém vozidle Nissan Leaf. Tato baterie obsahuje 192 článků, kde každý z nich má napětí 3,85 V, kapacitu 32 Ah a váží 868 g. Celá baterie se skládá ze 16 modulů, kde každý z nich je sestaven ze skupiny 12 článků, a jednotlivé moduly jsou od sebe odděleny polymerovými distančními vložkami, které jsou mezi sebou zapojeny v sérii a umístěny v hliníkovém zásobníku. Celková váha baterie je 221,6 kg, z toho 166,6 kg váží články, 8,9 kg chladící systém, 8,5 kg BMS a 37,6 kg obalový materiál (Obr. 30).



Obr. 30 Hmotností složení 24kWh LMO akumulátoru, upravené [22]

Z výsledků studie [22] vyplývá, že na vyrobení jednoho článku je zapotřebí 13,28 kWh energie, přičemž skoro 50 % je spotřebováno při procesu sušení elektrod. Při sečtení všech dalších výrobních procesů se na výrobu celé baterie spotřebuje okolo 11,1 MWh energie. Celková energetická náročnost je v této studii uvedena jako primární energie, kterou se rozumí energie získaná z neobnovitelných zdrojů z přírody, a která nebyla dále zpracována do formy sekundární energie (např. elektřiny). Celková spotřebovaná primární energie činí 88,9 GJ, z níž největší množství energie je použito na výrobu akumulátorových článku (58,7 GJ). Při přepočítání primární energie na elektrickou podle zdroje [80], který uvádí, že výroba elektrické energie z primárních zdrojů je s 35% účinností, vychází energetická účinnost výroby na 1296,5 MJ/kWh$_a$. Produkce emisí skleníkových plynů během výrobní fáze v této studii není uvedena.

Jelikož se v dnešní době LMO a NCA akumulátory v elektrických autech téměř nepoužívají (v roce 2022 NCA akumulátory tvořily 9 % podílu na trhu) [79], odpovídá tomu i nízké množství provedených LCA studií v posledních letech (2016–2024). Často tyto studie neobsahují všechny informace ohledně kapacity, celkové hmotnosti nebo podrobném materiálovém složení akumulátoru. Zároveň zkoumají jiné midpointové indikátory než CED a GWP nebo jen jednu z požadovaných hodnot. Souhrnná studie [82] zmiňuje studii [84] na LMO akumulátor o kapacitě 46,8 kWh a hmotnosti 399,3 kg z roku 2018, která uvádí hodnotu CED 736,6 MJ/kWh$_a$ a GWP 71,8 kgCO_2e/kWh$_a$. Studie [89] z roku 2017 neuvádí energetickou náročnost, ale zmiňuje hodnotu GWP 96,6 kgCO_2e/kWh$_a$.

Podobně to platí i pro NCA akumulátor, kde v rozmezí let 2016 až 2024 byly provedeny jen dvě LCA studie obsahující kapacitu a váhu akumulátoru a jeho energetickou a emisní náročnost. Studie [90] z roku 2019 uvádí hodnotu CED 462,9 MJ/kWh$_a$, která počítá jen s energií spotřebovanou na výrobu a montáž akumulátoru, nikoliv s energií potřebnou pro těžbu surovin a přípravu materiálu. Hodnota je GWP 123 kgCO_2e/kWh$_a$ a sledovaný akumulátor měl kapacitu 20 kWh a hmotnost 154 kg. Studie [84] uvádí hodnotu CED 736,6 MJ/kWh$_a$, která je stejná jak pro NMC a LMO akumulátor zmíněný v této kapitole ze stejné studie. Kapacita NCA akumulátoru v této studii je 46,8 kWh a hmotnost 316,5 kg. Hodnota GWP je v tomto případě 92,3 kgCO_2e/kWh$_a$.

4.4 CRADLE-TO-GATE ANALÝZY NiMH AKUMULÁTORŮ

Studie [37] analyzovala NiMH akumulátor pro plug-in hybridní a plně elektrická vozidla, ale nespecifikovala kapacitu nebo celkovou váhu akumulátoru. Zmiňuje ale energetickou hustotu NiMH akumulátoru, která je 55 Wh/kg. Autoři vztahují výsledky dopadů na životní prostředí ke třem funkčním jednotkám. První z nich je 50 MJ uchované energie v akumulátoru, druhá vykresluje výsledky na 1 kg akumulátoru a třetí na 1 kWh akumulátoru. Pro tuto práci jsou relevantní výsledky vztažené ke kWh akumulátoru. Vstupní data byla použita ze systému Ecoinvent 2.2 s uvažováním evropského energetického mixu. Na určení kategorií dopadů na životní prostředí byla použita midpointová metoda ReCiPe. Autoři sdělují, že celková energetická náročnost výrobní fáze NiMH akumulátoru je 3700 MJ/kWh$_a$ z toho 2100 MJ/kWh$_a$ na výrobní procesy a 1600 MJ/kWh$_a$ na přípravu materiálu. Kategorie dopadu GWP sledující vyprodukované emise skleníkových plynů během této fáze životního cyklu ukazuje celkovou hodnotu 350 kgCO_2e/kWh$_a$. Největší dopad na životní prostředí má samotná fáze výroby a montáže akumulátoru, která je zodpovědná za skoro 40 % celkového GWP. Materiál na katodu tvoří více než 20 % celkového GWP.

Studie [27] sleduje cradle-to-gate koncept NiMH akumulátoru, kde autoři přesně nespecifikují jeho kapacitu a hmotnost. Tato studie zahrnuje analýzu dvou scénářů, kdy první scénář sleduje tento proces bez zahrnutí recyklovaných materiálů. Naopak ve druhém scénáři jsou požadované suroviny dodány z primárních zdrojů, avšak zároveň jsou integrovány i recyklované materiály. Tab. 5 ukazuje množství primárních materiálů pro oba scénáře, které jsou vztaženy k funkční jednotce 1000 kg vyrobených a recyklovaných NiMH akumulátorů. Potřebná vstupní data vycházejí z literárních studií, oficiálních dat od společnosti Toyota a z databáze Ecoinvent.

Tab. 5 Množství primárních materiálů potřebných ve scénáři 1 a ve scénáři 2 vztažených na 1000 kg vyrobených a recyklovaných NiMH akumulátorů, upravené [27]

Materiály	scénář 1 - hmotnost [kg]	scénář 2 - hmotnost [kg]
Separátor	40,0	40,0
Záporná elektroda		
Nikl	213,3	69,9
Vzácné zeminy (mischmetal)	59,5	8,9
Karboxymethyl	5,1	5,1
Tetrafluorethylen	5,1	5,1
Uhlíková čerň	34,0	34,0
Vodík	156,4	156,4
Kladná elektroda		
Síran nikelnatý	283,9	283,9
Hydroxid sodný	146,2	146,2
Uhlíková čerň	20,0	20,0
Elektrolyt		
Hydroxid draselný	23,4	23,4
Hydroxid lithný	1,8	1,8
Demineralizovaná voda	64,8	64,8
Pouzdro článku – chromovaná ocel	100,0	20,0
Akumulátorový pack – Polyethylen	170,0	170,0

Tab. 6 ukazuje energetickou náročnost výrobní a recyklační části s uvažováním energetického mixu v Německu. Hodnoty jsou opět vztaženy k funkční jednotce 1000 kg.

Tab. 6 Spotřebovaná energie na výrobní a recyklační procesy vztažené na 1000 kg vyrobených a recyklovaných NiMH akumulátorů, upravené [27]

Spotřeba energie [MJ]	Výroba	Recyklace
Elektřina – drcení		1207,1
Elektřina – sušení		10863,5
Elektřina – prosévání		3319,4
Elektřina – hydrometalurgie		1264,0
Teplo (zemní plyn) - hydrometalurgie		5346,0
Elektřina	52895,8	
Teplo – těžký topný olej	5787,6	
Teplo – zemní plyn	42316,6	

Kategorie dopadů byly určeny pomocí midpointové metody CML-IA, kde hodnota GWP pro scénář 1 vychází 22300 $kgCO_2e/t$ a pro scénář dva 27300 $kgCO_2e/t$. To znamená, že z hlediska emisí skleníkových plynů zahrnutí recyklace není přínosné pro životní prostředí, protože nárůst GWP je o 22,3 % oproti scénáři 1 bez zahrnutí recyklovaných materiálu na výrobu akumulátoru. Kategorie dopadu CED pro scénář 1 ukazuje hodnotu 271000 MJ/t a pro scénář 2 332000 MJ/t. Nárůst je stejný jak u GWP a tedy 22,3 %. Studie tyto vyšší hodnoty u scénáře 2 komentuje tím, že hydrometalurgický proces používaný k recyklaci kovů je energetický velmi náročný a u GWP je zodpovědný za 24,3 % z celkové hodnoty. Pro účely

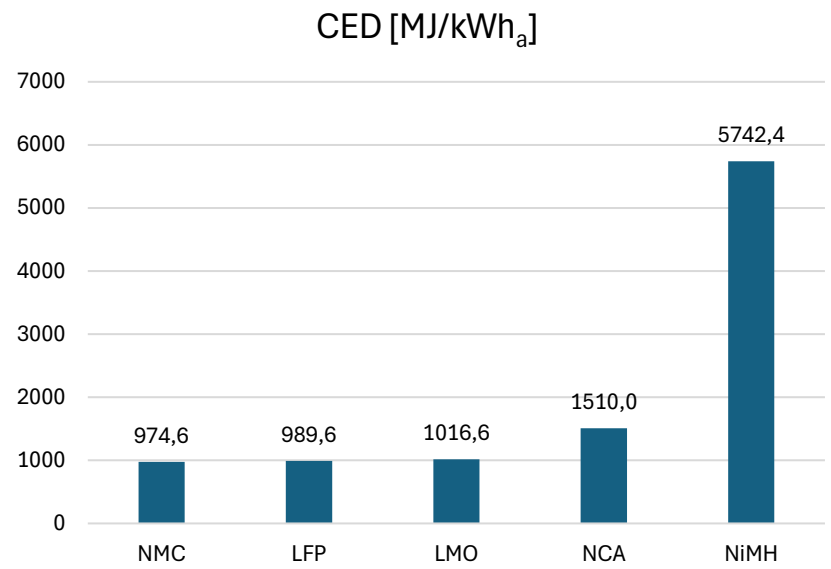
této práce se hodnoty CED a GWP přepočítají na kWh NiMH akumulátoru Toyoty Prius, který má kapacitu 1,3 kWh a váhu 37,2 kg [94]. Uvažuje se pouze scénář 1 bez použití recyklovaných materiálů ve výrobě. Hodnota GWP je potom 638,2 $kgCO_2e/kWh_a$ a CED 7784,8 MJ/kWh_a.

4.5 SHRNUTÍ A POROVNÁNÍ ZÍSKANÝCH DAT OHLEDNĚ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ AKUMULÁTORŮ

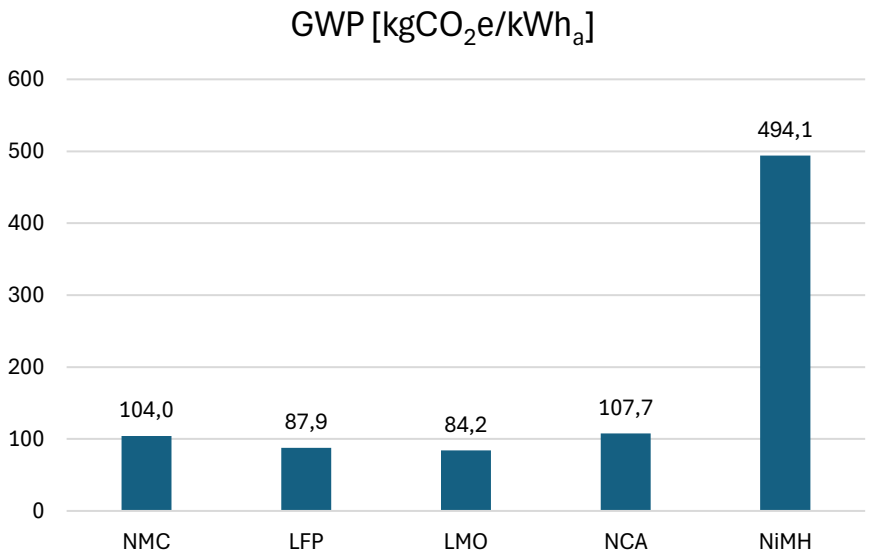
Dohromady bylo analyzováno celkem 22 typů akumulátorů z LCA studií, kde 21 z nich bylo publikováno v rozmezí let 2016–2023, přičemž jedna studie na NiMH akumulátor je z roku 2011. Tab. 7 je souhrnná tabulka všech studií s detailnějšími informacemi.

Průměrná energetická náročnost výrobní fáze NMC akumulátorů v životním cyklu činí 974,6 MJ/kWh_a a emise skleníkových plynů s touto fázi spojenou ukazují hodnotu 104 $kgCO_2e/kWh_a$. U LFP akumulátorů je průměrná energetická náročnost vyšší jen o 1,5 % oproti CED u NMC akumulátorů a ukazuje potřebnou energii 989,6 MJ/kWh_a. Naopak LFP akumulátory jsou šetrnější k životnímu prostředí z hlediska emisí skleníkových plynů, kdy hodnota GWP 87,9 $kgCO_2e/kWh_a$ je o 18 % nižší než u NMC akumulátorů. Průměr GWP u NMC akumulátorů především ovlivňuje hodnota (180,8 $kgCO_2e/kWh_a$) ze studie [85], která je vyšší o více jak 70 % než ta průměrná. Může to být způsobeno tím, že tato studie [85] používá vstupní data ze studie [37], která je z roku 2011 a jako vstupní data používá hodnoty z roku 2000.

Průměrná energetická náročnost LMO akumulátorů má hodnotu 1016,6 MJ/kWh a kategorie dopadu GWP vyšla 84,2 $kgCO_2e/kWh_a$. Průměr spotřebované energie v cradle-to-gate konceptu NCA akumulátorů byla převzata ze studie [86], která shrnula 6 LCA studií a uvádí pro ně hodnotu 1510 MJ/kWh. NCA akumulátory mají průměr GWP 107,7 $kgCO_2e/kWh_a$. Průměrné hodnoty CED a GWP na kWh NiMH akumulátoru jsou výrazně vyšší než u těch lithium iontových, a to je především způsobeno nízkou energetickou hustotou. Energetická náročnost cradle-to-gate konceptu NiMH akumulátorů je 5742,4 MJ/kWh_a a emisní stopa je 494,1 $kgCO_2e/kWh_a$. Všechny průměrné hodnoty CED a GWP pro jednotlivé typy akumulátorů jsou uvedeny na Obr. 31 a Obr 32. Studie [86] zároveň zmiňuje, že přístup, jakým jsou studie prováděny, výrazně ovlivňuje konečné hodnoty. Přístup zdola nahoru (bottom-up neboli process-based) používá data z jednotlivých fází výroby a na tomto základě určuje celkovou spotřebu energie. Druhý přístup, shora dolů (top-down), zahrnuje mimo jiné ještě energie všech pomocných výrobních procesů a využívá data pro celý výrobní závod. Obecně se dá říct, že výsledky kategorií dopadů jsou závislé na kvalitě vstupních dat, místě výroby a použitém energetickém mixu.



Obr. 31 Průměrné hodnoty CED z LCA studií pro jednotlivé typy akumulátorů



Obr. 32 Průměrné hodnoty GWP z LCA studií pro jednotlivé typy akumulátorů

Tab. 7 Souhrnná tabulka 22 typů akumulátorů sledovaných v LCA studiích

Studie	Rok publikace	Typ akumulátoru	Kapacita [kWh]	Hmotnost [kg]	Energetický mix	LCI data	Těžba a příprava materiálu [MJ/kWh]	Výroba a montáž [MJ/kWh]	Recyklace [MJ/kWh]	CED [MJ/kWh]	GWP [kgCO_2e/kWh]
[75]	2020	NMC622-C	72,5	630,0	Čína	Data z průmyslu, Ecoinvent 3.0, GREET 2018	1097,8	137,5	-158,3	1077,0	93,6
[80]	2019	NMC111-C	23,5	165,0	USA	GREET 2018, BatPac 2018	900,8	225,2	-	1126,0	72,9
[83]	2018	NMC-C	100,0	790,0	Evropa	Ecoinvent 3.3, literatura	-	-	-	813,7	127,0
[91]	2023	NMC811-C	28,1	149,2	Čína	Ecoinvent 3.3, literatura	-	226,4	-	-	84,9
		NMC622-C	28,0	161,3			-	232,7	-	-	102,5
[92]	2019	NMC111-C	27,0	188,7	USA	GREET 2018, BatPac 2018	-	-	-	1157,4	74,0
[84]	2018	NMC333-C	46,8	329,1	Evropa	BatPac, GREET 2014, Ecoinvent 3.0	-	-	-	736,6	92,3
[85]	2017	NMC-C	51,0	485,0	USA	Data z průmyslu, BatPac 2015, literatura	-	-	-	958,6	180,8
[81]	2018	NMC-C	27,0	150,2	Čína	Data z průmyslu, GaBi 6.0, literatura	670,0	283,1	-	953,1	107,7
		LFP-C	39,4	218,8			670,0	282,9	-	952,9	111,9
[93]	2022	LFP-C	23,5	203,1	Čína	BatPac, literatura	-	170,0	-	-	76,7
[87]	2016	LFP-C	20,0	167,0	Čína	Data z průmyslu, literatura	-	-	-	1026,3	75,0
[88]	2017	LFP-C	76,0	599,0	Západní Evropa	Data z průmyslu, Ecoinvent 3.1, literatura	-	587,9	-	-	330,3
[86]	2017	LMO-C	-	-	-	-	-	-	-	810,0	55,0
		NCA-C	-	-	-	-	-	-	-	1510,0	116,0
[84]	2018	LMO-C	46,8	399,3	Evropa	BatPac, GREET 2014, Ecoinvent 3.0	-	-	-	736,6	71,8
[89]	2017	LMO-C	28,0	210,0	Čína	Data z průmyslu, BatPac 2015, literatura	-	-	-	-	96,6
[22]	2017	LMO-C	24,0	221,6	USA	-	-	463,2	-	1296,5	-
[90]	2019	NCA-C	20,0	154,0	Jižní Korea	Data od firmy Samsung, BatPac 3.1, literatura	-	462,9	-	-	123,0
[84]	2018	NCA-C	46,8	316,5	Evropa	BatPac, GREET 2014, Ecoinvent 3.0	-	-	-	736,6	92,3
[37]	2011	NiMH	-	-	Evropa	Ecoinvent 2.2	1600,0	2100,0	-	3700,0	350,0
[27]	2020	NiMH	1,3	37,2	Německo	Ecoinvent, data od společnosti Toyota, literatura	-	-	-	7784,8	638,2

5 DOPAD VÝROBY AKUMULÁTORŮ NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Tato část práce se zabývá různými scénáři výroby a jejich vlivem na změnu energetické náročnosti a dopadem na životní prostředí z pohledu vyprodukovaných emisí. Zprvu bude zkoumán vliv různých energetických mixů na GWP, tedy množství CO_2 emisí uvolněných při výrobě komponentů a montáži akumulátoru. Následovat bude srovnání současné výrobní technologie elektrod, což je mokrý způsob přípravy elektrod, s technologií, která se do budoucna jeví jako slibná náhrada současného výrobního procesu. Jedná se o suchý způsob výroby elektrod, který má potenciál snížit výrobní a energetické náklady a být šetrnější k životnímu prostředí z hlediska produkce emisí skleníkových plynů. Následovat bude aplikování scénáře, který kombinuje všechny uvažované opatření tak, aby byla emisní stopa výroby akumulátorů co nejnižší. Poslední kapitola shrne všechny zjištěné výstupy.

5.1 VLIV ENERGETICKÉHO MIXU NA EMISNÍ STOPU VÝROBY AKUMULÁTORŮ

Jak už bylo v práci zmíněno, množství vyprodukovaných emisí během výrobní fáze akumulátoru v životním cyklu je výrazně ovlivněno místem výroby a jeho energetickým mixem. Cradle-to-gate koncept se dělí především na dvě hlavní části: těžba a příprava materiálu a samotná výroba komponentů a montáž akumulátoru. Těžba nerostných surovin, jako je nikl, kobalt, lithium, mangan a grafit, je lokalizována jen v pár zemích na světě. Tyto suroviny jsou kritické pro výrobu akumulátorů. Příkladem může být spotřeba kobaltu pro akumulátory, která tvoří 58 % celosvětového trhu s kobaltem. Nejvíce kobaltu je těženo v Demokratické republice Kongo, zatímco grafit je nejvíce těžen v Číně. Největším producentem lithia, s podílem 44 %, je Chile, přičemž hlavními dodavateli niklu jsou Kuba a Austrálie [96]. Následná rafinace těchto surovin je převážně situovaná v Číně, která je zodpovědná za více jak 50 % produkce rafinovaného lithia, kobaltu a grafitu. Zároveň je zodpovědná za 70 % produkce materiálu na katody a za 90 % produkce materiálu na anody a elektrolyty [95]. Tyto procesy tvoří většinu z celkové energetické náročnosti (zhruba 70 %) v cradle-to-gate konceptu a jsou lokalizovány především v Číně, která má energetický mix založen převážně na spalování uhlí (asi 60 %) [97]. To s sebou nese vysokou produkci emisí, kterou je možné snížit např. změnou složení energetického mixu v Číně. Z tohoto důvodu je těžké ovlivnit tuto část životního cyklu z hlediska emisí skleníkových plynů.

Podle předchozí rešerše LCA studií v této práci je samotná výroba komponentů a montáž akumulátoru z hlediska energetické náročnosti a emisní stopy šetrnější k životnímu prostředí než fáze těžby a přípravy materiálu. Výroba komponentů a montáž akumulátoru tvoří ve většině případů 20 až 30 % z celkových hodnot CED a GWP. Proto místo, kde je výroba prováděna, má zásadní vliv na množství vyprodukovaných emisí skleníkových plynů. Tato část práce se zaměří na změnu v produkci emisí při výrobě komponentů a montáži akumulátoru v Číně, Norsku a Německu.

Čína má mnoho prvenství v ohledu elektromobility, a tak není divu, že tři čtvrtě všech lithium iontových baterií je produkováno právě tam. Zároveň byla Čína v roce 2020 zodpovědná za 77 % celosvětové výrobní kapacity (350 GWh) akumulátorových článků a 60 % světové výroby akumulátorových komponentů [75][98]. Podle zdroje [99] má být Německo do roku 2030 jednou z hlavních zemí, které se stanou největšími výrobci Li-ion baterií v Evropě a jejich výrobní kapacita by měla být několik GWh za rok. Norsko je zde zahrnuto z důvodu jedné z nejnižších produkcí emisí při výrobě elektřiny, a kvůli tomu se bude zkoumat scénář výroby

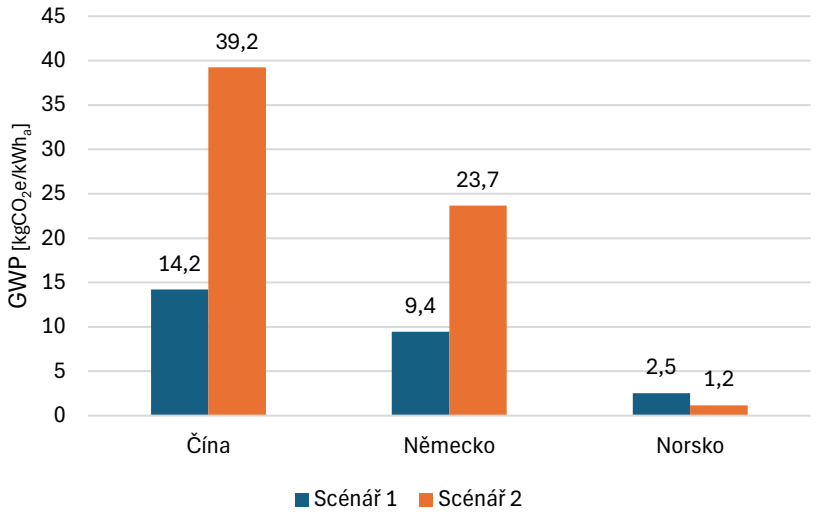
a montáže akumulátoru i v této zemi. V Číně i Německu byla v roce 2023 většina elektrické energie vyráběna z neobnovitelných zdrojů. V Německu to tvoří 60 % z celkové produkce elektrické energie, přičemž 42 % pochází z uhlí a zemního plynu. V Číně produkce elektrické energie z neobnovitelných zdrojů tvoří dokonce 70 % a z toho 64 % je z uhlí a zemního plynu. V Norsku je skoro všechna elektrická energie produkována z obnovitelných zdrojů, a to především z vodních elektráren, které tvoří téměř 92 % celkové produkce. Data o rozložení elektrického mixu jednotlivých zemí byla převzata z modelu GREET 2023. Tab. 8 znázorňuje uhlíkovou náročnost výroby elektrické energie pro zmíněné země. První hodnota je použita z modelu GREET 2023, kde však není zahrnuta následná distribuce vyrobené elektřiny. Druhá hodnota uhlíkové náročnosti výroby elektřiny pro zmíněné země je převzata z dat Energy Institute – Statistical Review of World Energy a Ember [100]. V následujících výpočtech se tedy bude uvažovat s průměrnou hodnotou z těchto dvou čísel.

Tab. 8 Uhlíková náročnost výroby na kWh elektrické energie pro jednotlivé země

Země	Uhlíková náročnost z modelu GREET 2023 [$kgCO_2e/kWh_e$]	Uhlíková náročnost ze zdroje [100] [$kgCO_2e/kWh_e$]	Průměrná hodnota z obou zdrojů [$kgCO_2e/kWh_e$]
Čína	0,625	0,582	0,604
Německo	0,347	0,381	0,364
Norsko	0,006	0,030	0,018

Výrobní část se skládá především z výroby článků a poté z jejich montáže do modulů a následného sestavení do celého akumulátorového packu. Jak je uvedeno v kapitole 4.1 ze zdrojů [75] a [80], procesy na výrobu článků jsou energeticky mnohem náročnější než montáž modulů a celého packu. Z hlediska vlivu na životní prostředí montáž vykazuje minimální vliv v porovnání s výrobou článků, a tak bude ve výpočtu zanedbána. Pro účel této práce se proto převezmou hodnoty energetické náročnosti výroby uvedené v kapitole 4.1 ze studie [75], která udává spotřebu 20 kWh elektrické energie a 9,5 kWh tepla ze zemního plynu na kWh kapacity článku. Zároveň je pro porovnání analyzován přístup, který předpokládá plně elektrifikovanou výrobu a na 1 kWh kapacity akumulátoru se spotřebuje 65 kWh elektrické energie [101].

Scénář 1, který uvažuje na výrobu mix elektrické energie a tepla, představuje dolní hranici spotřeby energie na výrobu akumulátoru. Scénář 2, který předpokládá plně elektrický výrobní proces, zastává horní hranici spotřeby energie. Pro výpočet je nutné určit uhlíkovou stopu výroby tepla při spalování zemního plynu. Zdroj [102] uvádí hodnotu 0,227 $kgCO_2e$ na kWh tepla. Znázornění obou scénářů pro posuzované země interpretuje Obr 33.



Obr. 33 Vliv dolní spotřeby energie (scénář 1) a horní spotřeby energie (scénář 2) na GWP ve sledovaných zemích

Scénář 1 naznačuje, že pro země s vysokou uhlíkovou náročností výroby elektřiny jako je právě Čína a Německo, může použití kombinace tepla a elektřiny na výrobu akumulátoru snížit dopad GWP. Musí však platit předpoklad, že uhlíková náročnost výroby tepla při spalování zemního plynu je nižší než emise elektrického mixu dané země. Pokud tento fakt neplatí, jako v případě Norska, je použití kombinace tepla a elektřiny emisně horší než plně elektrifikovaná výroba. Scénář 1 v Norsku má o více jak 100 % vyšší GWP než scénář 2, i přesto, že scénář 1 představuje dolní hranici v množství potřebné energie. V absolutních hodnotách oba scénáře produkují malé množství emisí a jejich rozdíl je zanedbatelný (1,3 $kgCO_2e/kWh_a$).

V případě Německa a Číny při uvažování scénáře 2 je hodnota dopadu GWP razantně vyšší v porovnání s Norskem. Při spotřebě energie ve scénáři 2 je v Německu GWP skoro 20krát vyšší než v Norsku a v Číně dokonce více než 30krát. I při uvažování stejného množství energie na výrobu akumulátorů v obou scénářích, pro země jako jsou Čína a Německo, kde je vysoká uhlíková náročnost výroby elektrické energie, je z hlediska životního prostředí výhodnější používat mix elektrické energie a tepla.

5.2 VLIV ZMĚNY VÝROBNÍ TECHNOLOGIE NA ENERGETICKOU NÁROČNOST A ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

V předešlých kapitolách (4.1 a 5.1) bylo již zmíněno, že ve fázi výroby komponentů a montáže akumulátoru je energeticky nejnáročnější výroba článků (cca 80 %). V současné době se na výrobu článků používá tzv. mokrý postup výroby, který se dá rozdělit do tří kroků: výroba elektrod, montáž článků a konečná úprava článků. První fáze zahrnuje smíchání aktivního materiálu (např. NMC prášek pro katodu a grafit pro anodu) s pojivem (PVDF), rozpouštědlem (methylpyrrolidon – NMP) a sazemi. Následuje nanášení této smíchané hmoty na nosné fólie, které jsou pro katodu vyrobeny z hliníku a pro anodu z mědi. Poté přichází na řadu proces sušení, aby došlo k odpaření NMP rozpouštědla. Následuje kalandrování, kde jsou fólie stlačeny a pak rozřezány na úzké proužky. Nakonec se rozřezané fólie podrobí vakuovému sušení. Po sestavení článků přichází na řadu proces formování, ve kterém jsou články nabíjeny a vybíjeny za přesně definovaných podmínek. Následuje proces stárnutí, kde jsou články

skladovány po dobu 1 až 3 týdnů, a ve finálním kroku jsou články podrobeny testování a tím je výrobní proces ukončen [96][103].

Mokrý způsob výroby elektrod je osvědčenou technologií, která poskytuje dobrou škálovatelnost, a tím pádem je v současné době důležitou technikou ve velkokapacitní komerční výrobě. Nese s sebou ale řadu nevýhod, jako je použití NMP rozpouštědla, které je toxické a má negativní dopad na životní prostředí. Zároveň je dalším problémem vysoká spotřeba energie na sušení elektrod a s tím spojená produkce CO_2 emisí. S tím se pojí i vysoké výrobní náklady. Z tohoto důvodu jsou snahy vyvinout alternativní řešení výroby elektrod, které by tyto problémy eliminovaly. Jednou z nejslibnějších technologií se jeví suchý způsob výroby elektrod. Tento způsob nepotřebuje k smíchání materiálů použití rozpouštědla a díky tomu odpadá i nutnost energeticky náročného sušení [78].

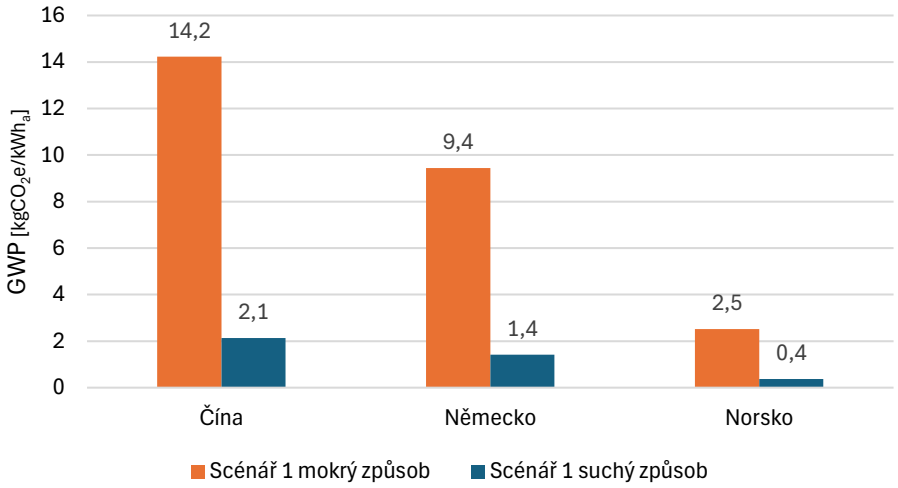
Suchý způsob výroby elektrod v podstatě zahrnuje stejné výrobní procesy jako mokrý způsob, jen s tím rozdílem, že při míchání materiálu není přidáváno rozpouštědlo a tím pádem není potřebné ani následné sušení. Suchý způsob výroby elektrod se tedy skládá ze suchého míchání, suchého povlakování, kalandrování a řezání. Suché míchání může být provedeno několika způsoby, například pomocí dvojitého břitového mletí (angl. double blade milling) nebo kuličkového mletí (angl. ball milling). Pomocí jedné z těchto metod se smíchá aktivní materiál s pojivem a sazemi tak, aby vznikla homogenní směs. Následné suché povlakování je možné provést čtyřmi způsoby: lisování a vytlačování za tepla, 3D tisk, suchý nástřik a suché povlakování podle Maxwella. Typ suchého povlakování se vybírá podle typu použitého pojiva. S pojivem PVDF, které je nejpoužívanější při výrobě elektrod, se pojí povlakování za využití suchého nástřiku. Homogenní směs je tedy pomocí nástřiku nanesena na fólii (proudový kolektor) a vytvoří se film s proudícím plynem. Poté přichází na řadu válcování za tepla (kalandrování za tepla), které roztaví pojivo a umožní pevné spojení kolektoru se směsí. Po těchto procesech se fólie nařeže a sestaví se článek. Následuje proces formování a stárnutí jak u elektrod s mokrým způsobem výroby [66].

Z pohledu energetické náročnosti zdroj [66] uvádí, že 47 % celkově spotřebované energie u mokrého procesu výroby se spotřebuje na sušení a regeneraci rozpouštědel. V předešlé kapitole bylo zjištěno, že proces sušení zastává až 80 % z celkové energetické náročnosti výroby elektrod. Autoři ve studii [91] konstatují, že na sušení elektrod se spotřebuje 167,6 MJ na kWh akumulátoru z celkových 226,4 MJ/kWh_a, což je skoro 75 %. Spotřeba energie pro suchý postup výroby elektrod se tedy bude uvažovat bez energie potřebné pro sušení. Při převzetí hodnot z kapitoly 5.1 pro scénář 1 s dolní hranicí energetické náročnosti na výrobu akumulátoru mokrým způsobem, který udával 20 kWh elektrické energie a 9,5 kWh tepla na kWh akumulátoru, je náročnost suchého procesu výroby 4,4 kWh na kWh akumulátoru. Při scénáři 2, který ukazuje horní hranici spotřeby energie na výrobu akumulátoru (65kWh) mokrým procesem, to u suchého způsobu dělá 9,75 kWh elektrické energie na kWh akumulátoru.

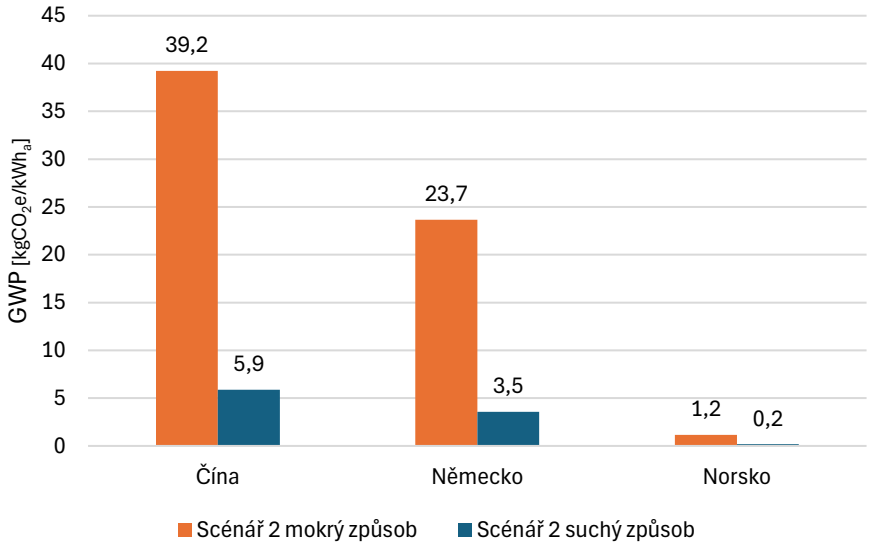
Tab. 9 Spotřeba energie na kWh akumulátoru pro mokrý a suchý způsob výroby

Způsob výroby		**elektrická energie [kWh/kWh_a]**	**teplo [kWh/kWh_a]**
Mokrý způsob výroby	scénář 1	20	9,5
	scénář 2	65	-
Suchý způsob výroby	scénář 1	3	1,425
	scénář 2	9,75	-

Obr. 34 a Obr. 35 zobrazují produkci emisí skleníkových plynů pomocí dopadu GWP pro suchý způsob výroby elektrod v porovnání s mokrým v Číně, Německu a Norsku.



Obr. 34 Porovnání GWP pro mokrý a suchý způsob výroby elektrod při uvažování dolní hranice energetické náročnosti výroby – Scénář 1



Obr. 35 Porovnání GWP pro mokrý a suchý způsob výroby elektrod při uvažování horní hranice energetické náročnosti výroby – Scénář 2

Z výsledků je možné pozorovat, že změna způsobu výroby má zásadní vliv na konečnou produkci CO_2 emisí. V případě Číny klesly emise skleníkových plynů při uvažování dolní hranice spotřeby energie na výrobu (scénář 1) z 14,2 $kgCO_2e/kWh_a$ na 2,1 $kgCO_2e/kWh_a$ a v případě Německa z 9,4 $kgCO_2e/kWh_a$ na 1,4 $kgCO_2e/kWh_a$. V absolutních číslech je tento pokles ještě razantnější při horní energetické spotřebě energie na výrobu (scénář 2), kdy v Číně je pokles dopadu GWP o 33,3 $kgCO_2e/kWh_a$ a v Německu o 20,2 $kgCO_2e/kWh_a$.

5.3 VLIV KOMBINACE UVAŽOVANÝCH OPATŘENÍ NA EMISNÍ STOPU VÝROBY

Tato část práce ukazuje, jak by mohla vypadat celá výrobní fáze v životním cyklu akumulátoru při kombinaci všech uvažovaných opatření na snížení energetické náročnosti a produkci emisí v porovnání se současným stavem bez uvážení recyklace. Jak už bylo uvedeno v kapitole 5.1 většina Li-ion akumulátorů se vyrábí především v Číně a s tím je i spojená vyšší produkce CO_2 emisí kvůli jejich energetickému mixu. Tato část práce proto předkládá scénář, jak změna energetického mixu výroby elektrické energie, změna výrobního procesu elektrod a částečná recyklace ovlivní produkci CO_2 emisí v cradle-to-gate konceptu. Jako poklad a zároveň srovnání budou sloužit data ze studie [75] pro NMC622 akumulátor z roku 2020, kde autoři použili vstupní data především od výrobců akumulátorů, a proto se dají považovat za nejvíce relevantní.

Jak už bylo řečeno v kapitole 5.1 většina výroby elektrické energie v Číně pochází z uhelných elektráren. Zdroj [91] však uvádí předpokládanou změnu energetického mixu v produkci elektrické energie v Číně, kdy by v roce 2040 jeho složení mohlo vypadat následovně: 32 % uhelné elektrárny, 12 % vodní elektrárny, 28 % větrné elektrárny, 15,5 % solární elektrárny a 12,5 % jaderné elektrárny. Tab. 10 ukazuje uhlíkovou náročnost výroby elektrické energie jednotlivých zdrojů.

Tab. 10 Uhlíková náročnost jednotlivých zdrojů na výrobu kWh elektrické energie, upravené [11]

Zdroj elektrické energie	Uhlíková náročnost [$kgCO_2e/kWh_e$]
Uhelná elektrárna	0,820
Vodní elektrárna	0,024
Větrná elektrárna	0,011
Solární elektrárna	0,048
Jaderná elektrárna	0,012

Vynásobením uhlíkových náročností výroby jednotlivých zdrojů s procentuálním zastoupením těchto zdrojů v energetickém mixu Číny v roce 2040, vychází celková uhlíková náročnost výroby elektrické energie 0,277 $kgCO_2e/kWh_e$. U fáze přípravy materiálu se bude uvažovat s použitím čistě elektrické energie. S uvažováním částečné recyklace studie [75] uvádí hodnotu energetické náročnosti přípravy materiálu 939,5 MJ/kWh_a, což činí 261 kWh/kWh_a. Výpočet GWP pro tuto fázi výroby je následující:

$$EN_M \cdot X_{Č} = 261 \cdot 0{,}277 = 72{,}3\ kgCO_2e/kWh_a$$

EN_M energetická náročnost přípravy materiálu [kWh/kWh_a]

$X_{Č}$ uhlíková náročnost výroby elektrické energie v Číně (rok 2040) [$kgCO_2e/kWh_e$]

Ve fázi výroby a montáže akumulátoru při plně elektrifikovaném suchém výrobním procesu se spotřebuje 9,75 kWh elektrické energie na kWh akumulátoru, jak je uvedeno v Tab. 9 pro scénář 2 suchý způsob. Výpočet GWP pro fázi výroby a montáže je tedy následovný:

$EN_F \cdot X_Č = 9,5 \cdot 0,277 = 2,2\ kgCO_2e/kWh_a$

EN_F energetická náročnost výroby a montáže [kWh/kWh_a]

$X_Č$ uhlíková náročnost výroby elektrické energie v Číně (rok 2040) [$kgCO_2e/kWh_e$]

Jak je uvedeno v kapitole 4.1 podle studie [75], částečná recyklace může snížit dopad GWP o 23 %. V tomto případě se díky recyklaci sníží emise skleníkových plynů o 17,1 $kgCO_2e/kWh_a$. S uvažováním všech výše rozepsaných scénářů je výsledná hodnota dopadu GWP pro cradle-to-gate koncept v životním cyklu akumulátoru 57,4 $kgCO_2e/kWh_a$. Pro srovnání je uvedena hodnota GWP pro výrobní fázi NMC622 akumulátoru ze studie [75]. V Tab. 11 jsou uvedeny hodnoty GWP pro představený scénář výroby v Číně s opatřeními na snížení emisí CO_2 a hodnoty GWP ze studie [75]. Z Tab. 11 je možné vidět, že se při aplikování všech posuzovaných opatření je možné snížit emise skleníkových plynů o 54 %.

Tab. 11 Hodnoty dopadu GWP jednotlivých fází cradle-to-gate konceptu životního cyklu akumulátoru pro scénář nízkého GWP a pro studii [75]

Fáze cradle-to-gate	Čína – scénář nízké GWP [$kgCO_2e/kWh_a$]	Čína – studie [75] [$kgCO_2e/kWh_a$]
Fáze přípravy materiálu	72,3	105,5
Fáze výroby a montáže	2,2	19,0
Recyklace	-17,1	-
Celkem	57,4	124,5

5.4 SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ

Tato kapitola shrnuje všechny získané výsledky ohledně energetické náročnosti a emisí v cradle-to-gate konceptu životního cyklu akumulátoru pro elektromobily. V kapitole 4 jsou shrnuty informace z 17 LCA studií o jednotlivých typech akumulátorů v první fázi životního cyklu výrobku, tedy koncept cradle-to-gate. Hlavním cílem bylo zjistit energetickou náročnost a emisní stopu výroby. Podrobnější popis výsledků a souhrnná tabulka studií jsou uvedeny v kapitole 4.5. Získané průměrné hodnoty CED a GWP pro jednotlivé typy akumulátorů jsou následující:

- NMC: CED = 974,6 MJ/kWh_a; GWP = 104,0 $kgCO_2e/kWh_a$
- LFP: CED = 989,6 MJ/kWh_a; GWP = 87,9 $kgCO_2e/kWh_a$
- LMO: CED = 1016,6 MJ/kWh_a; GWP = 84,2 $kgCO_2e/kWh_a$
- NCA: CED = 1510,0 MJ/kWh_a; GWP = 107,7 $kgCO_2e/kWh_a$
- NiMH: CED = 5742,4 MJ/kWh_a; GWP = 494,1 $kgCO_2e/kWh_a$

Kapitola 4 ukazuje různorodost výsledků energetické náročnosti a vyprodukovaných emisí během výrobního cyklu. Zjistilo se, že jen některé studie uvádí hodnoty CED a GWP pro všechny fáze cradle-to-gate konceptu. Odvíjí se to především od cílů jednotlivých LCA studií

a také od kvality vstupních dat. Právě absence primárních údajů z průmyslu ve vstupních datech zapříčiňuje nekonzistenci LCA výsledků. Je to z toho důvodu, že studie většinou spoléhaly na použití sekundárních údajů, které byly autory pomocí různých modelovacích softwarů modifikovány pro dosažení vlastních cílů. Různorodost vstupních údajů z těchto zdrojů tak mohou způsobit chyby ve výpočtech GWP a CED.

Kapitola 5.1 se zabývala vlivem energetického mixu na emisní stopu výroby akumulátorů ve třech zemích: Čína, Německo a Norsko. Uvažovaly se dva scénáře, kde jeden představoval dolní hranici spotřeby energie a druhý horní hranici spotřeby energie na výrobu akumulátoru. Výsledky GWP pro jednotlivé země jsou následující:

- Čína: GWP (scénář 1) = 14,2 $kgCO_2e/kWh_a$; GWP (scénář 2) = 39,2 $kgCO_2e/kWh_a$
- Německo: GWP (scénář 1) = 9,4 $kgCO_2e/kWh_a$; GWP (scénář 2) = 23,7 $kgCO_2e/kWh_a$
- Norsko: GWP (scénář 1) = 2,5 $kgCO_2e/kWh_a$; GWP (scénář 2) = 1,2 $kgCO_2e/kWh_a$

Z výsledků plyne, že pokud je uhlíková náročnost výroby elektrické energie dané země vyšší než uhlíková náročnost výroby tepla, tak se z hlediska snížení produkce emisí skleníkových plynů vyplatí použít kombinaci elektrické energie a tepla na výrobu akumulátoru. Norsko ukazuje případ pro země s nízkou uhlíkovou náročností výroby elektrické energie. Přestože scénář 2 s čistě elektrifikovanou výrobou má vyšší požadavek na spotřebu energie, tak produkce emisí je nižší než při výrobě s nízkou spotřebou energie. Je to z toho důvodu, že výroba akumulátoru s nízkou spotřebou energie využívá jako zdroj kromě elektrické energie také teplo, které má při výrobě ze zemního plynu vyšší uhlíkovou náročnost než výroba elektrické energie.

Kapitola 5.2 porovnávala dva technologické postupy výroby a jejich energetickou náročnost a dopad na životní prostředí z hlediska CO_2 emisí. Byly uvažovány stejné tři místa výroby a stejné dva scénáře jak v kapitole 5.1. Výsledky GWP pro suchý proces výroby je následující:

- Čína: GWP (scénář 1) = 2,1 $kgCO_2e/kWh_a$; GWP (scénář 2) = 5,9 $kgCO_2e/kWh_a$
- Německo: GWP (scénář 1) = 1,4 $kgCO_2e/kWh_a$; GWP (scénář 2) = 3,5 $kgCO_2e/kWh_a$
- Norsko: GWP (scénář 1) = 0,4 $kgCO_2e/kWh_a$; GWP (scénář 2) = 0,2 $kgCO_2e/kWh_a$

Tyto výsledky kopírují stejné principy scénářů jako v kapitole 5.2 jen s tím rozdílem, že dolní i horní hranice spotřeby energie na výrobu akumulátoru jsou snížené o 75 % díky absenci sušících procesů v suchém způsobu výroby. Z toho plyne další snížení absolutních hodnot GWP ve fázi výroby a montáže akumulátoru.

Kapitola 5.3 uvádí vliv kombinace různých opatření na snížení negativního dopadu na životní prostředí z hlediska emisí skleníkových plynů. Jde zde ukázán scénář výroby v Číně s jejím předpokládaným energetickým mixem v roce 2040. Zároveň je použit suchý způsob výroby elektrod, který vykazuje nižší emise než současný mokrý proces výroby. V neposlední řadě je uvažováno s použitím recyklovaných materiálů ve fázi přípravy materiálů. Výsledek GWP pro scénář s nízkou produkcí CO_2 emisí v Číně je následující:

- Fáze přípravy materiálu: GWP = 72,3 $kgCO_2e/kWh_a$
- Fáze výroby a montáže akumulátoru: GWP = 2,2 $kgCO_2e/kWh_a$
- Recyklace: GWP = -17,1 $kgCO_2e/kWh_a$
- Celkem: GWP = 57,4 $kgCO_2e/kWh_a$

Pomocí výpočtů bylo zjištěno, že produkce emisí skleníkových plynů ve výrobní fázi akumulátoru se mohou snížit až o 54 % oproti původnímu stavu. Je nutné zmínit, že se jedná o zjednodušenou úvahu, která ale může ukázat budoucí vývoj ve snaze snižovat negativní dopady na životní prostředí.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala LCA studiemi, které analyzovaly výrobní fázi životního cyklu akumulátoru pro elektromobily. Důraz byl kladen na energetickou náročnost a emisní stopu výroby různých typů akumulátorů. Získaná data byla použita pro demonstraci vybraných scénářů, pomocí kterých bylo znázorněno možné snížení emisí skleníkových plynů ve výrobní fázi akumulátoru.

V práci byly analyzovány dostupné publikace LCA analýz, které mají poskytnout užitečné informace a ucelenější obraz o cradle-to-gate konceptu životního cyklu akumulátoru. Ze získaných dat je energeticky nejmíň náročná výroba NMC akumulátoru (974,6 MJ/kWh$_a$) a nejnižší produkce emisí ve výrobní fázi vykazuje LMO akumulátor (84,2 kgCO_2e/kWh$_a$). Každopádně výstupy LCA studií jsou silně závislé na kvalitě vstupních dat, které většinou postrádají primární informace a často jsou založeny na sekundárních údajích z literatury a z různých databází.

Následně byla posuzována různá opatření, která měla za úkol snížit dopady výroby akumulátoru na životní prostředí. Bylo zjištěno, že použití energetického mixu s nízkou uhlíkovou náročností může výrazně snížit celkovou hodnotu emisí skleníkových plynů ve výrobní fázi. Zároveň byla uvažována změna výrobního procesu elektrod ze současného mokrého způsobu výroby na relativně nový suchý způsob. Tento proces výroby také výrazně ovlivňuje celkovou produkci CO_2 emisí ve fázi výroby a montáže akumulátoru, neboť bylo zjištěno, že se spotřeba energie sníží o 75 % oproti mokrému procesu. Pro země s energetickým mixem s vyšší uhlíkovou náročností výroby elektrické energie je obzvlášť výhodné implementování tohoto způsobu výroby, protože zapříčiní další výrazné snížení negativních dopadů na životní prostředí z hlediska emisí.

Na závěr byl proveden ukázkový případ, kdy byla aplikována všechna zmíněná opatření na cradle-to-gate fázi životního cyklu akumulátoru. Výsledná hodnota emisí skleníkových plynů na kWh kapacity akumulátoru v této fázi životního cyklu je 57,4 kgCO_2e, což je snížení až o 54 % oproti srovnávacímu stavu získaného z rešerše LCA studií. Tato zjednodušená úvaha může ukázat cesty, jak snižovat produkci emisí ve výrobní fázi akumulátoru. Nicméně by měly být zkoumány i jiné kategorie dopadů než pouze potenciál globální oteplování pro plnohodnotné posouzení dopadů výroby akumulátorů na životní prostředí.

Z výsledků diplomové práce plyne, že je důležité dbát na spolehlivost a aktuálnost primárních dat pro LCA analýzy. Používání starých údajů v odvětví, jako je elektromobilita, kde se technologie rychle vyvíjejí, může vést k nesprávným závěrům a chybným rozhodnutím. Větší důraz by mohl být kladen na fázi po konci životnosti akumulátoru. Opětovné použití recyklovaných materiálů má potenciál přispět ke snížení negativních dopadů na životní prostředí díky omezení používání primárních materiálů. Zároveň sekundární využití akumulátorů jako stacionární uložiště energie může být v tomto směru prospěšné. Také zlepšení vlastností akumulátorů, jako je prodloužení životnosti nebo vyšší energetická hustota, by mohly pomoci snížit celkové negativní dopady výroby.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] *Realizace Zelené dohody pro Evropu: Přechod ke klimatické neutralitě Evropy do roku 2050*. Online. Oficiální internetová stránka Evropské unie. Dostupné z: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_cs. [cit. 2024-02-01].

[2] *Reducing carbon emissions: EU targets and policies*. Online. EU Monitor. Dostupné z: https://www.eumonitor.eu/9353000/1/j9vvik7m1c3gyxp/vkmiobvzi1x7?ctx=vhsjgh0wpcp9. [cit. 2024-02-01].

[3] A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards. Online. Dostupné z: https://theicct.org/publication/a-technical-summary-of-euro-6-vi-vehicle-emission-standards/. [cit. 2024-02-01].

[4] *Nařízení Euro 7: Rada a Parlament dosáhly předběžné dohody o emisních limitech pro silniční vozidla*. Online. Dostupné z: https://www.consilium.europa.eu/cs/press/press-releases/2023/12/18/euro-7-council-and-parliament-strike-provisional-deal-on-emissions-limits-for-road-vehicles/. [cit. 2024-02-22].

[5] *Eletric Vehicles: Eletric car sales break new records with momentum expected to continue through 2023*. Online. Dostupné z: https://www.iea.org/energy-system/transport/electric-vehicles#tracking. [cit. 2024-02-01].

[6] HIRZ, M.; NGUYEN, T.T. Life-Cycle CO2-Equivalent Emissions of Cars Driven by Conventional and Electric Propulsion Systems. World Electr. Veh. J. **2022**, 13, 61. https://doi.org/10.3390/wevj13040061 Academic Editor: Michael Fowler

[7] BROWN, Sarah a JONES, Dave. European Electricity Review 2024. Online. *EMBER*. 2024. Dostupné z: https://ember-climate.org/insights/research/european-electricity-review-2024/. [cit. 2024-05-16].

[8] WARNER, John T. *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types and Terminology*. Elsevier, 2015. ISBN 9780128016688.

[9] BHATT, Anand; FORSYTH, Maria; WITHERS, Ray a WANG, Guoxiu. *How do batteries power our phones, computers and other devices?* Online. In: Australian Academy of Science. 2016. Dostupné z: https://www.science.org.au/curious/technology-future/batteries. [cit. 2024-03-16].

[10] BAAZOUZI, Sabri; FEISTEL, Niklas; WANNER, Johannes; LANDWEHR, Inga; FILL, Alexander et al. Design, Properties, and Manufacturing of Cylindrical Li-Ion Battery Cells—A Generic Overview. Online. *Batteries*. 2023, roč. 9, č. 6. ISSN 2313-0105. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/batteries9060309. [cit. 2024-05-16].

[11] Carbon Dioxide Emissions From Electricity. 2024. Online. *World Nuclear Association*. 2024. Dostupné z: https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity#References. [cit. 2024-05-24].

[12] NUR HALIMAH, Putri; RAHARDIAN, Samuel a BUDIMAN, Bentang Arief. Battery Cells for Electric Vehicles. Online. *International Journal of Sustainable Transportation Technology*. 2019, roč. 2, č. 2, s. 54-57. ISSN 26557975. Dostupné z: https://doi.org/10.31427/IJSTT.2019.2.2.3. [cit. 2024-05-16].

[13] WALDMANN, Thomas; SCURTU, Rares-George; RICHTER, Karsten a WOHLFAHRT-MEHRENS, Margret. 18650 vs. 21700 Li-ion cells – A direct comparison of electrochemical, thermal, and geometrical properties. Online. *Journal of Power Sources*. 2020, roč. 472. ISSN 03787753. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228614. [cit. 2024-05-16].

[14] *Tesla přechází na články 4680. Mají generovat méně tepla*. Online. In: Portál řidiče. 2023. Dostupné z: https://www.portalridice.cz/clanek/tesla-prechazi-na-clanky-4680-maji-generovat-mene-tepla. [cit. 2024-03-22].

[15] TRANTER, T. G.; TIMMS, R.; SHEARING, P. R. a BRETT, D. J. L. Communication—Prediction of Thermal Issues for Larger Format 4680 Cylindrical Cells and Their Mitigation with Enhanced Current Collection. Online. *Journal of The Electrochemical Society*. 2020, roč. 167, č. 16. ISSN 0013-4651. Dostupné z: https://doi.org/10.1149/1945-7111/abd44f. [cit. 2024-05-16].

[16] LANDINI, S.; LEWORTHY, J. a O'DONOVAN, T.S. A Review of Phase Change Materials for the Thermal Management and Isothermalisation of Lithium-Ion Cells. Online. *Journal of Energy Storage*. 2019, roč. 25. ISSN 2352152X. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100887. [cit. 2024-05-16].

[17] ZHAO, Gang; WANG, Xiaolin a NEGNEVITSKY, Michael. Connecting battery technologies for electric vehicles from battery materials to management. Online. *IScience*. 2022, roč. 25, č. 2. ISSN 25890042. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103744. [cit. 2024-05-16].

[18] *Electric Vehicle Battery Breakdown: Cells to Modules to Packs!*. In: Youtube. Online. 20.2.2024. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=hBbhevHZZ5E. Kanál uživatele Munro Live. [cit.2024-04-25].

[19] MA, Shuai; JIANG, Modi; TAO, Peng; SONG, Chengyi; WU, Jianbo et al. Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review. Online. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2018, roč. 28, č. 6, s. 653-666. ISSN 10020071. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002. [cit. 2024-05-16].

[20] *What Are LiFePO4 Prismatic Cells? Which One Is The Best?* Online. In: ELB Energy Group. 2021. Dostupné z: https://www.ecolithiumbattery.com/what-are-lifepo4-prismatic-cells/. [cit. 2024-03-26].

[21] NELSON, P.A., AHMED, S., GALLAGHER, K.G. a DEES, D.W., 2019. Modeling the performance and cost of lithium-ion batteries for electric-drive vehicles (No. ANL/CSE-19/2). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States). Dostupné z: https://publications.anl.gov/anlpubs/2011/10/71302.pdf. [cit. 2024-04-20].

[22] YUAN, Chris; DENG, Yelin; LI, Tonghui a YANG, Fan. Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles. Online. *CIRP Annals*. 2017, roč. 66, č. 1, s. 53-56. ISSN 00078506. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.109. [cit. 2024-05-16].

[23] What Is Battery Electrolyte and How Does It Work? 2022. Online. *Dragonfly Energy*. Dostupné z: https://dragonflyenergy.com/battery-electrolyte/. [cit. 2024-04-20].

[24] MAJEAU-BETTEZ, Guillaume; HAWKINS, Troy R. a STRØMMAN, Anders Hammer. Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles. Online. *Environmental Science & Technology*. 2011, roč. 45, č. 10, s. 4548-4554. ISSN 0013-936X. Dostupné z: https://doi.org/10.1021/es103607c. [cit. 2024-05-16].

[25] DENG, Yuanwang; FENG, Changling; E, Jiaqiang; ZHU, Hao; CHEN, Jingwei et al. Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review. Online. *Applied Thermal Engineering*. 2018, roč. 142, s. 10-29. ISSN 13594311. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.043. [cit. 2024-05-16].

[26] *Understanding Global Warming Potentials*. Online. EPA: United States Environmental Protection Agency. 2024. Dostupné z: https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials. [cit. 2024-05-16].

[27] SILVESTRI, Luca; FORCINA, Antonio; ARCESE, Gabriella a BELLA, Gino. Recycling technologies of nickel–metal hydride batteries: An LCA based analysis. Online. *Journal of Cleaner Production*. 2020, roč. 273. ISSN 09596526. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123083. [cit. 2024-05-16].

[28] *Abiotic depletion potential*. Online. Designing Buildings. 2024. Dostupné z: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Abiotic_depletion_potential. [cit. 2024-04-10].

[29] TICHÝ, Jiří., 2015. Lithiové akumulátory: Přehled základních typů a jejich vlastností. Online. *Tzbinfo. cz*. Dostupné z: https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory. [cit. 2024-04-11].

[30] BHUTADA, Govind. *The Six Major Types of Lithium-ion Batteries: A Visual Comparison.* Online. Elements. 2023. Dostupné z: https://elements.visualcapitalist.com/the-six-major-types-of-lithium-ion-batteries/. [cit. 2024-05-16].

[31] *BU-205: Types of Lithium-ion*. Online. Battery University. 2023. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion. [cit. 2024-05-16].

[32] DE LOOPER, Christian. *Lithium-ion vs. NiMH: EV batteries explained and compared.* Online. Digitaltrends. 2023. Dostupné z: https://www.digitaltrends.com/cars/lithium-ion-vs-nimh-ev-car-batteries-compared-explained/. [cit. 2024-05-16].

[33] BÖRJESSON Axén, J., 2023. *The dynamic behavior of the NiMH battery–Creating a versatile NiMH battery model*. Doctoral dissertation, Kungliga Tekniska högskolan. Dostupné z: https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1807568/FULLTEXT01.pdf

[34] *What's the Best Battery?*. Online. Battery University. 2017. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/article/whats-the-best-battery. [cit. 2024-05-16].

[35] HEJČÍK, Jiří; FIŠER, Jan. Přednáška 8 - Tepelný management vozidel. Tepelný management (QTE). Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Fakulta strojního inženýrství. Vysoké učení technické v Brně. 2024. Dostupné z: vozidelhttps://moodle.vut.cz/pluginfile.php/561163/mod_resource/content/9/QTE-Prednaska08_Tep_mng_aku_2023.pdf

[36] MAIORINO, Angelo; CILENTI, Claudio; PETRUZZIELLO, Fabio a APREA, Ciro. A review on thermal management of battery packs for electric vehicles. Online. *Applied Thermal Engineering*. 2024, roč. 238. ISSN 13594311. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122035. [cit. 2024-05-16].

[37] MAJEAU-BETTEZ, Guillaume; HAWKINS, Troy R. a STRØMMAN, Anders Hammer. Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles. Online. *Environmental Science & Technology*. 2011, roč. 45, č. 10, s. 4548-4554. ISSN 0013-936X. Dostupné z: https://doi.org/10.1021/es103607c. [cit. 2024-05-16].

[38] ŠÁNDOR, Kristián. Aplikace metody posuzování životního cyklu výrobku (LCA) na osobní vozidla. Brno, 2023. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/149405. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství

[39] *What is Life Cycle Assessment (LCA)?* Online. Sphera. 2020. Dostupné z: https://sphera.com/glossary/what-is-a-life-cycle-assessment-lca/. [cit. 2024-04-02].

[40] *Life Cycle Assessment (LCA) – Everything you need to know*. Online. Ecochain. 2024. Dostupné z: https://ecochain.com/blog/life-cycle-assessment-lca-guide/. [cit. 2024-03-26].

[41] MORGENSTERN, Catherine. *WELL TO WHEEL EMISSIONS SIMPLIFIED. Online*. Cummins. 2022. Dostupné z: https://www.cummins.com/news/2022/05/26/well-wheel-emissions-simplified. [cit. 2024-05-16].

[42] *Well to Wheels. Energy Systems and Infrastructure Analysis*. Online. Greet. 2024. Dostupné z: https://greet.es.anl.gov/greet/gettingstarted/wtw.html. [cit.2023-04-08].

[43] ROSENBAUM, Ralph K.; HAUSCHILD, Michael Z.; BOULAY, Anne-Marie; FANTKE, Peter; LAURENT, Alexis et al. Life Cycle Impact Assessment. Online. In: HAUSCHILD, Michael Z.; ROSENBAUM, Ralph K. a OLSEN, Stig Irving (ed.). *Life Cycle Assessment*. Cham: Springer International Publishing, 2018, s. 167-270. ISBN978-3-319-56474-6. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_10. [cit. 2024-05-16].

[44] [44] JANSSEN, Artjom. Explained: LCIA Methods. Online. *Ecochain Help Center*. 2024. Dostupné z: https://helpcenter.ecochain.com/en/articles/9055669-explained-lcia-methods. [cit. 2024-04-26].

[45] [45] *Environmental footprint methods*. Online. In: European Commission. Directorate-General for Environment. 2021. Dostupné z: https://environment.ec.europa.eu/news/environmental-footprint-methods-2021-12-16_en. [cit. 2024-05-16].

[46] MENOUFI, Karim Ali Ibrahim. 2011. Life cycle analysis and life cyle impact assessment methodologies: a state of the art. Dostupné z: https://repositori.udl.cat/items/19cf81ab-6334-4505-9072-ca8dcef31fe5. [cit. 2024-05-24].

[47] RYBERG, Morten; VIEIRA, Marisa D. M.; ZGOLA, Melissa; BARE, Jane a ROSENBAUM, Ralph K. Updated US and Canadian normalization factors for TRACI 2.1. Online. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2014, roč. 16, č. 2, s. 329-339. ISSN 1618-954X. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s10098-013-0629-z. [cit. 2024-04-06].

[48] SANNE, Karin a RYDBERG, Tomas. *Environmental Priority Strategies (EPS)*. Online. In: IVL Swedish Environmental Research Institute. 2024. Dostupné z: https://www.ivl.se/english/ivl/our-offer/our-focus-areas/consumption-and-production/environmental-priority-strategies-eps.html. [cit. 2024-05-16].

[49] Humbert, S., Margni, M. and Jolliet, O., 2012. IMPACT 2002+: user guide. *Draft for version Q*, *2*. Dostupné z:

[50] JOLLIET, Olivier a et al. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment. Online. 2003, 8(6), 324-330. ISSN 0948-3349. Dostupné z: doi:10.1007/BF02978505. [cit. 2023-04-13].

[51] [51] NICHOLS, Dave. *EV Battery Degradation and How to Prevent It*. Online. Green Cars. 2023. Dostupné z: https://www.greencars.com/greencars-101/battery-degradation-and-how-to-prevent-it. [cit. 2024-05-16].

[52] FANORO, Mokesioluwa; BOŽANIĆ, Mladen a SINHA, Saurabh. A Review of the Impact of Battery Degradation on Energy Management Systems with a Special Emphasis on Electric Vehicles. Online. *Energies*. 2022, roč. 15, č. 16. ISSN 1996-1073. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/en15165889. [cit. 2024-05-16].

[53] *Tesla Battery Degradation - The results using real data and why the Plaid is the worst Tesla!*. In: Youtube. Online. 30.3.2024. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=hTt2libO-vM&ab_channel=TeslaInfo. Kanál uživatele Tesla Info. [cit.2024-04-25].

[54] WILDBERG, Roland. So teuer sind Tauschakkus fürs Elektroaut. Online. *Auto Bild*. 2024. Dostupné z: https://www.autobild.de/artikel/akku-beim-e-auto-tauschen-warum-er-30.000-euro-kosten-kann-21232250.html. [cit. 2024-03-16].

[55] WITT, Jon. Electric Car Battery Replacement Costs. Online. *Recurrent*. 2024. Dostupné z: https://www.recurrentauto.com/research/costs-ev-battery-replacement. [cit. 2024-04-20].

[56] IMANISHI, Nobuyuki a YAMAMOTO, Osamu. Rechargeable lithium–air batteries: characteristics and prospects. Online. *Materials Today*. 2014, roč. 17, č. 1, s. 24-30. ISSN 13697021. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.12.004. [cit. 2024-03-18].

[57] SURYATNA, Asep; RAYA, Indah; THANGAVELU, Lakshmi; ALHACHAMI, Firas Rahi; KADHIM, Mustafa M. et al. A Review of High-Energy Density Lithium-Air Battery Technology: Investigating the Effect of Oxides and Nanocatalysts. Online. *Journal of Chemistry*. 2022, roč. 2022, s. 1-32. ISSN 2090-9071. Dostupné z: https://doi.org/10.1155/2022/2762647. [cit. 2024-05-16].

[58] LI, Lucky. Lithium air battery types - advantages and disadvantages. Online. *Tycorun Energy*. 2023. Dostupné z: https://www.takomabattery.com/lithium-air-battery/. [cit. 2024-04-06].

[59] LITHIUM SULFUR BATTERY VS LITHIUM ION BATTERY - COMPARISON AND HOW TO CHOOSE. Online. *Tycorun Energy*. 2023. Dostupné z: https://www.tycorun.com/blogs/news/lithium-sulfur-battery-vs-lithium-ion-battery. [cit. 2024-05-16].

[60] NAKAMURA, Natsuki; AHN, Seongki; MOMMA, Toshiyuki a OSAKA, Tetsuya. Future potential for lithium-sulfur batteries. Online. *Journal of Power Sources*. 2023, roč. 558. ISSN 03787753. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232566. [cit. 2024-04-24].

[61] BRUCE, Peter G.; HARDWICK, Laurence J. a ABRAHAM, .M. Lithium-air and lithium-sulfur batteries. Online. *MRS Bulletin*. 2011, roč. 36, č. 7, s. 506-512. ISSN 0883-7694. Dostupné z: https://doi.org/10.1557/mrs.2011.157. [cit. 2024-04-25].

[62] NUGROHO, S., 2019. *Comparison Power Consumption 125 Watts Pump by Using AC and DC Based on Solar Energy*. 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT). Bali, Indonesia. Review of Solid-State Battery Technology Progress. Dostupné z: https://doc-pak.undip.ac.id/id/eprint/14962/1/sulistyo2019.pdf

[63] VANDEWOUER, Ruben. *Solid-State Batteries: Benefits and Drawbacks*. Online. Econopolis. 2023. Dostupné z: https://www.econopolis.be/en/blog/posts/2023/december/solid-state-batteries-benefits-and-drawbacks/. [cit. 2024-04-16].

[64] Trh s akumulátory roste, technologie však dostatečně neuspokojí rostoucí potřeby. *Technický týdeník*. 2024, roč. 19, č. 4, s. 12-13.

[65] *Sodium-ion batteries: the revolution in renewable energy storage*. Online. Iberdrola. 2024. Dostupné z: https://www.iberdrola.com/sustainability/environment/energy-efficiency/sodium-ion-batteries. [cit. 2024-04-21].

[66] LU, Y., ZHAO, C.Z., YUAN, H., Hu, J.K., HUANG, J.Q. a ZHANG, Q., 2022. *Dry electrode technology, the rising star in solid-state battery industrialization*. Matter, 5(3), pp.876-898. Dostupné z: https://www.cell.com/matter/pdf/S2590-2385(22)00011-X.pdf. [cit. 2024-04-24].

[67] DESJARDINS, Jeff. *The Evolution of Battery Technology. Online.* Visual Capitalist. 2016. Dostupné z: https://www.visualcapitalist.com/evolution-of-battery-technology/. [cit. 2024-04-16].

[68] *BU-203: Nickel-based Batteries*. Online. Battery University. 2021. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/article/bu-203-nickel-based-batteries. [cit. 2024-03-16].

[69] *Will China pull ahead with battery technology? | Transforming Business.* In: Youtube. Online. 16.3.2024. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=bdF1rH9q8qs&ab_channel=DWNews. Kanál uživatele DW News. [cit.2024-04-17].

[70] *New study reveals lead batteries are the most recycled product in the U.S. with a 99% recycling rate*. Online. International Lead Association. 2023. Dostupné z: https://ila-lead.org/new-study-reveals-lead-batteries-are-the-most-recycled-product-in-the-u-s-with-a-99-recycling-rate/. [cit. 2024-04-16].

[71] BENVENISTE, Gabriela; SÁNCHEZ, Anna; RALLO, Hector; CORCHERO, Cristina a AMANTE, Beatriz. Comparative life cycle assessment of Li-Sulphur and Li-ion batteries for electric vehicles. Online. *Resources, Conservation & Recycling Advances*. 2022, roč. 15. ISSN 26673789. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200086. [cit. 2024-04-13].

[72] ŠURKALA, Milan. *NIO ET7 letos dostane semi-solid-state baterii s 360Wh/kg, výrobcem je WeLion*. Online. In: Svět Hardware. 2022. Dostupné z: https://www.svethardware.cz/nio-et7-letos-dostane-semi-solid-state-baterii-s-360wh-kg-vyrobcem-je-welion/57383. [cit. 2024-04-09].

[73] *Motory a příslušenství*. Online. Mihocar. 2024. Dostupné z: https://www.mihocar.cz/motor-kompletni-czd-1-4-tsi-110-kw-vw-passat-b8-3g0-lift/d-193216?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwz42xBhB9EiwA48pT701Kb0XnVz8RXczRzgnLL7YXPEWoappUTHLQaHP9fSjnnWRpLa9s0BoCIbAQAvD_BwE. [cit. 2024-05-24].

[74] ZHAO, Enoch; WALKER, Paul D.; SURAWSKI, Nic C. a BENNETT, Nick S. Assessing the life cycle cumulative energy demand and greenhouse gas emissions of lithium-ion batteries. Online. *Journal of Energy Storage*. 2021, roč. 43. ISSN 2352152X. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103193. [cit. 2024-04-18].

[75] SUN, Xin; LUO, Xiaoli; ZHANG, Zhan; MENG, Fanran a YANG, Jianxin. Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles. Online. *Journal of Cleaner Production*. 2020, roč. 273. ISSN 09596526. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123006. [cit. 2024-04-27].

[76] SCHWEBER, Bill. Lithium Batteries for EVs: NMC or LFP? Online. *EE Timese*. 2023. Dostupné z: https://www.eetimes.com/lithium-batteries-for-evs-go-nmc-or-lfp/. [cit. 2024-04-01].

[77] DHAGE, Aditya. Volkswagen MEB Battery Pack ID Family. Online. *Baterry Design*. 2023. Dostupné z: https://www.batterydesign.net/volkswagen-meb-battery-pack-id-family/. [cit. 2024-04-23].

[78] BOUGUERN, Mohamed Djihad; MADIKERE RAGHUNATHA REDDY, Anil Kumar; LI, Xia; DENG, Sixu; LARYEA, Harriet et al. Engineering Dry Electrode Manufacturing for Sustainable Lithium-Ion Batteries. Online. *Batteries*. 2024, roč. 10, č. 1. ISSN 2313-0105. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/batteries10010039. [cit. 2024-05-24].

[79] *Trends in batteries*. Online. IEA. Global EV Outlook 2023. 2023. Dostupné z: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-batteries. [cit. 2024-03-27].

[80] DAI, Qiang; KELLY, Jarod C.; GAINES, Linda a WANG, Michael. Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. Online. *Batteries*. 2019, roč. 5, č. 2. ISSN 2313-0105. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/batteries5020048. [cit. 2024-05-17].

[81] YU, Ang; WEI, Yiqun; CHEN, Wenwen; PENG, Najun a PENG, Lihong. Life cycle environmental impacts and carbon emissions: A case study of electric and gasoline vehicles in China. Online. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018, roč. 65, s. 409-420. ISSN 13619209. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.009. [cit. 2024-04-30].

[82] ZHAO, Enoch; WALKER, Paul D.; SURAWSKI, Nic C. a BENNETT, Nick S. Assessing the life cycle cumulative energy demand and greenhouse gas emissions of lithium-ion batteries. Online. *Journal of Energy Storage*. 2021, roč. 43. ISSN 2352152X. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103193. [cit. 2024-04-27].

[83] WU, Zheshan a KONG, Defei. Comparative life cycle assessment of lithium-ion batteries with lithium metal, silicon nanowire, and graphite anodes. Online. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2018, roč. 20, č. 6, s. 1233-1244. ISSN 1618-954X. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s10098-018-1548-9. [cit. 2024-04-20].

[84] GIORDANO, Alessandro; FISCHBECK, Paul a MATTHEWS, H. Scott. Environmental and economic comparison of diesel and battery electric delivery vans to inform city logistics fleet replacement strategies. Online. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018, roč. 64, s. 216-229. ISSN 13619209. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.10.003. [cit. 2024-04-30].

[85] DENG, Yelin; LI, Jianyang; LI, Tonghui; ZHANG, Jingyi; YANG, Fan et al. Life cycle assessment of high capacity molybdenum disulfide lithium-ion battery for electric vehicles. Online. *Energy*. 2017, roč. 123, s. 77-88. ISSN 03605442. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.096. [cit. 2024-04-26].

[86] ETERS, Jens F.; BAUMANN, Manuel; ZIMMERMANN, Benedikt; BRAUN, Jessica a WEIL, Marcel. The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, roč. 67, s. 491-506. ISSN 13640321. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.039. [cit. 2024-04-26].

[87] LU, Qiang; WU, Peng Fei; SHEN, Wan Xia; WANG, Xue Chao; ZHANG, Bo et al. Life Cycle Assessment of Electric Vehicle Power Battery. Online. *Materials Science Forum*. 2016, roč. 847, s. 403-410. ISSN 1662-9752. Dostupné z: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.847.403. [cit. 2024-04-27].

[88] ZACKRISSON, Mats., 2017. *Life cycle assessment of long life lithium electrode for electric vehicle batteries: cells for Leaf*, Tesla and Volvo bus. Dostupné z: https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1131667&dswid=1646. [cit. 2024-04-28].

[89] HAO, Han; MU, Zhexuan; JIANG, Shuhua; LIU, Zongwei a ZHAO, Fuquan. GHG Emissions from the Production of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles in China. Online. *Sustainability*. 2017, roč. 9, č. 4. ISSN 2071-1050. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/su9040504. [cit. 2024-04-14].

[90] PHILIPPOT, Maeva; ALVAREZ, Garbiñe; AYERBE, Elixabete; VAN MIERLO, Joeri a MESSAGIE, Maarten. Eco-Efficiency of a Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles: Influence of Manufacturing Country and Commodity Prices on GHG Emissions and Costs. Online. *Batteries*. 2019, roč. 5, č. 1. ISSN 2313-0105. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/batteries5010023. [cit. 2024-04-17].

[91] JIANG, Tingting; WANG, Huifang a JIN, Qiang. Comparison of three typical lithium-ion batteries for pure electric vehicles from the perspective of life cycle assessment. Online. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2024, roč. 26, č. 2, s. 331-350. ISSN 1618-954X. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s10098-023-02629-6. [cit. 2024-4-30].

[92] KELLY, Jarod C.; DAI, Qiang a WANG, Michael. Globally regional life cycle analysis of automotive lithium-ion nickel manganese cobalt batteries. Online. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2020, roč. 25, č. 3, s. 371-396. ISSN 1381-2386. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s11027-019-09869-2. [cit. 2024-04-30].

[93] QUAN, Jiawei; ZHAO, Siqi; SONG, Duanmei; WANG, Tianya; HE, Wenzhi et al. Comparative life cycle assessment of LFP and NCM batteries including the secondary use and different recycling technologies. Online. *Science of The Total Environment*. 2022, roč. 819. ISSN 00489697. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153105. [cit. 2024-04-29].

[94] *Toyota Prius Gen 2 Battery*. Online. In: Battery Design: from chemistry to pack. 2022. Dostupné z: https://www.batterydesign.net/toyota-prius-gen-2-battery/. [cit. 2024-04-24].

[95] CARREON, Alessandra R. THE EV BATTERY SUPPLY CHAIN EXPLAINED. Online. *RMI: Energy transformed*. 2023. Dostupné z: https://rmi.org/the-ev-battery-supply-chain-explained/. [cit. 2024-04-24].

[96] ACCARDO, Antonella; DOTELLI, Giovanni a SPESSA, Ezio. A Study on the Cradle-to-Gate Environmental Impacts of Automotive Lithium-ion Batteries. Online. *Procedia CIRP*. 2024, roč. 122, s. 1077-1082. ISSN 22128271. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.02.037. [cit. 2024-05-24].

[97] YIN, Ivy. 2024. Coal still accounted for nearly 60% of China's electricity supply in 2023: CEC. Online. *S&P Global*.. Dostupné z: https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/013124-coal-still-accounted-for-nearly-60-of-chinas-electricity-supply-in-2023-cec. [cit. 2024-04-24].

[98] KILBEY, Ben. 2020. China continues to dominate global EV supply chain: BNEF. Online. *S&P Global*. Dostupné z: https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/electric-power/091620-china-continues-to-dominate-global-ev-supply-chain-bnef. [cit. 2024-04-24].

[99] MAISCH, Marija. 2022. Europe’s gigafactory boom in full swing with another plant announcement. Online. *PV Magazine*. Dostupné z: https://www.pv-magazine.com/2022/02/17/europes-gigafactory-boom-in-full-swing-with-another-plant-announcement/. [cit. 2024-04-24].

[100] *Carbon intensity of electricity generation*. Online. Our World in Data. 2024. Dostupné z: https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity. [cit. 2024-05-04].

[101] DAVIDSSON KURLAND, Simon. Energy use for GWh-scale lithium-ion battery production. Online. *Environmental Research Communications*. 2019, roč. 2, č. 1. ISSN 2515-7620. Dostupné z: https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab5e1e. [cit. 2024-05-04].

[102] Innovation Norway, 2023. Conversion Guidelines–Greenhouse gas emissions. Energy Efficiency Progeamme in Romania. Dostupnné z: https://www.eeagrants.gov.pt/media/2776/conversion-guidelines.pdf. [cit. 2024-05-04].

[103] DEGEN, Florian a SCHÜTTE, Marius. Life cycle assessment of the energy consumption and GHG emissions of state-of-the-art automotive battery cell production. Online. *Journal of Cleaner Production*. 2022, roč. 330. ISSN 09596526. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129798. [cit. 2024-05-24].

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

°C		Celsius
Ah		ampérhodina
Al		hliník
BEV		Bateriový elektromobil; battery electric vehicle
BMS		Systém řízení baterie; Battery Management System
CB		Uhlíkové saze
CED		Kumulativní energetická náročnost; Cumulative Energy Demand
CML		Centrum environmentálních věd Leiden; Centrum voor Milieukunde Leiden
CO_2		oxid uhličitý
Cu		měď
DMC		Dimethylkarbonát
EC		Ethylenkarbonát
EDIP		Environmentální design průmyslových výrobků; Environmental Design of Industrial Products
EF		Environmentální stopa; Environmental Footprint
ELU		Jednotka environmentální zátěže; Environmental Load Unit
EN_m	[kWh/kWh$_a$]	energetická náročnost přípravy materiálu
EPA		Agentura pro ochranu životního prostředí; Environmental Protection Agency
EU		Evropská unie
g		gram
GREET		Greenhouse Gases, Regulated Emissions and Energy Use in Transportation
GWh		gigawatthodina
GWP		Potenciál globálního oteplování; Global Warming Potential
JRC		Společné výzkumné středisko; Joint Research Centre
kg		kilogram
$kgCO_2e$		Kilogram CO_2 ekvivalent
kWh		kilowatthodina
kWh_a		Kilowatthodina akumulátoru
kWh_e		Kilowatthodina elektrické energie

LCA		Metoda posuzování životního cyklu; Life Cycle Assessment
LCI		Invertarizace životního cyklu; Life Cycle Inventory
LCIA		Posouzení vlivů životního cyklu; Life Cycle Impact Assessment
LCO		Lithium-kobalt-oxid
LFP		Lithium-železo-fosfát
$LiCoO_2$		Lithium-kobalt oxid
$LiMn_2O_4$		Lithium-mangan oxid
$LiNiO_2$		Lithium-nikl dioxid
$LiPF_6$		Hexafluorofosforečnan lithný
Li-S		Lithium-síra
LMO		Lithium-mangan-oxid
LTO		Lithium-titan-oxid
mAh		miliampérhodina
MJ		megajoule
NCA		Nikl-kobalt-hliník
NiCd		Nikl-kadmium
NiMH		Nikl-metal-hydrid
NMC		Nikl-mangan-kobalt
NO_x		oxidy dusíku
PE		Polyethylen
PP		Polypropylen
PVDF		Polyvinylidenefluorid
SBR		Styren-butadienový kaučuk
TRACI		Nástroj pro snižování a posuzování chemických a jiných dopadů na životní prostředí; Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts
TSTR		Tranzistor
UBP		Eko-body; environmental loading points
V		Volt
Wh		watthodina
$X_{Č}$	[$kgCO_2e/kWh_e$]	uhlíková náročnost výroby elektrické energie v Číně (rok 2040)