



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel

Emise CO₂ při výrobě baterií

CO₂ emissions from battery production

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2020

Tomáš STRAŇÁK

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Josef Morkus, CSc.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Straňák** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **475013**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Emise CO2 při výrobě baterií

Název bakalářské práce anglicky:

CO2 emissions from battery production

Pokyny pro vypracování:

Proveďte rešerši dostupných studií emisí CO2 vznikajících při výrobě baterií pro elektrická vozidla. Rozlišujte rozdílné přístupy podle toho, co vše je do studií zahrnuto (těžba surovin, výroba bateriových článků, výroba kompletních baterií, recyklace ap.) Vyhodnoťte výsledky studií a analyzujte jednotlivé vlivy na velikost výsledných emisí CO2 při výrobě různých druhů baterií.

Seznam doporučené literatury:

KOKA 2019, článek v Československý Dopravák, zahraniční studie IVL, Berylls, Joaneum, internet

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

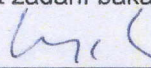
Ing. Josef Morkus, CSc., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

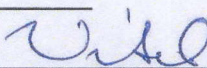
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

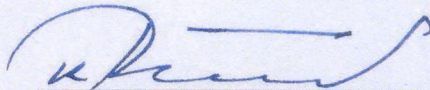
Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Josef Morkus, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

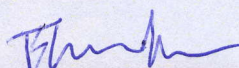

doc. Ing. Oldřich Vitek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

22.6.2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta



Anotační záznam

Jméno autora: Tomáš Straňák

Název práce: Emise CO₂ při výrobě baterií

Anglický název: CO₂ emissions from battery production

Rozsah práce:

73 stran

9 obrázků

21 tabulek

Akademický rok: 2019/2020

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Vedoucí práce: Ing. Josef Morkus, CSc.

Klíčová slova: Baterie, Výroba, Emise, CO₂, Oxid uhličitý, Elektromobil,

Key words: Battery, Manufacture, Production, Emissions, CO₂, Carbon dioxide, Electric vehicle



Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá tématem vzniku emisí CO₂ při výrobě baterií pro elektrická vozidla. Jedná se o rešerši a analýzu dostupných studií na toto téma. K dispozici je rozbor, který se zaměřuje na vyhodnocení výsledných emisí CO₂ s ohledem na vliv rozdílných metodik autorských kolektivů jednotlivých studií. Výsledky studií jsou porovnány dle vybraných kritérií a zohledněny v rámci celkového vyhodnocení výsledné produkce emisí CO₂ při výrobě baterií.

Abstract

This bachelor's thesis deals with production of CO₂ emissions from manufacture of batteries for electric vehicles. It's a review and analysis of available studies on this topic. The analysis is focused on evaluation of total CO₂ emissions with consideration of different methods of single studies. All results are compared between themselves according to various parameters and considered in final evaluation of total production of CO₂ emissions from battery manufacturing.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: “Emise CO₂ při výrobě baterií” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitulu této práce.

V Praze dne: 7. července 2020

.....

(podpis autora)



Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Josefu Morkusovi, CSc. za jeho odborné konzultace a věnovaný čas. Dále také mé přítelkyni Mgr. Radce Ondrové za trpělivost a podporu v nelehkých situacích, které často pramenily z absurdity program MS Word.



Obsah

1 Úvod.....	10
2 Zdroje studií.....	13
2.1 Ecoinvent	13
2.2 GaBi.....	14
2.3 GREET.....	15
2.4 GREET 2 Series (Vehicle-Cycle Model).....	15
2.4.1 Referenční data	16
2.4.2 Vstupní data.....	17
2.4.3 Okolnosti zisku výsledků.....	18
2.4.4 Energetický mix.....	18
2.4.5 Výsledky.....	19
2.4.6 Porovnání.....	20
3 Zkoumané studie a vědecké články	23
3.1 Qiang Dai a kolektiv (2019).....	23
3.1.1 Vstupní data.....	23
3.1.2 Okolnosti zisku výsledků.....	24
3.1.3 Energetický mix.....	26
3.1.4 Výsledky.....	27
3.1.5 Porovnání.....	27
3.2 Majeau-Bettez a kolektiv (2011)	28
3.2.1 Vstupní data.....	29
3.2.2 Okolnosti zisku výsledků.....	30
3.2.3 Energetický mix.....	32
3.2.4 Výsledky.....	32
3.3 Dunn a kolektiv (2015).....	33
3.3.1 Vstupní data.....	34
3.3.2 Okolnosti zisku výsledků.....	34
3.3.3 Výsledky.....	36



3.4 Dunn a kolektiv (2016).....	37
3.4.1 Vstupní data.....	38
3.4.2 Okolnosti zisku výsledků.....	38
3.4.3 Energetický mix.....	39
3.4.4 Výsledky.....	39
3.4.5 Porovnání.....	40
3.5 Ellingsen a kolektiv (2013).....	41
3.5.1 Vstupní data.....	41
3.5.2 Okolnosti zisku výsledků.....	41
3.5.3 Energetický mix.....	42
3.5.4 Výsledky.....	43
3.6 Kim a kolektiv (2016).....	43
3.6.1 Vstupní data.....	44
3.6.2 Okolnosti zisku výsledků.....	44
3.6.3 Energetický mix.....	45
3.6.4 Výsledky.....	46
3.6.5 Porovnání.....	46
3.7 Joanneum research (2019).....	47
3.8 IVL (2017).....	49
3.8.1 Výsledky.....	49
4 Grafické porovnání studií.....	51
4.1 Porovnání hlediska spotřebované elektrické energie.....	51
4.2 Porovnání z hlediska použité měrné energie ve studiích.....	53
4.3 Porovnání spotřebované elektřiny a hmotností baterií.....	54
4.4 Porovnání z hlediska vyprodukovaných emisí CO ₂	58
5 Vyhodnocení.....	60
5.1 Celkové zhodnocení.....	60
5.1.1 GREET 2 Series (Vehicle-Cycle Model) – 2018.....	60
5.1.2 Qiang Dai a kolektiv (2019).....	60



5.1.3 Majeau-Bettez a kolektiv (2011)	61
5.1.4 Dunn a kolektiv (2015)	61
5.1.5 Dunn a kolektiv (2016)	61
5.1.6 Ellingsen a kolektiv (2013)	61
5.1.7 Kim a kolektiv (2016)	62
5.1.8 Joanneum research (2019)	62
5.1.9 IVL (2017)	62
5.2 Zjištěné výsledky	62
5.2.1 Celkové emise	62
5.2.2 Celkové emise dle IVL (2017)	65
6 Závěr	67
7 Použitá literatura	68
8 Seznam obrázků	71
9 Seznam příloh	72
10 Přílohy	73



1 Úvod

Odvětví elektromobility zažívá v poslední době značný rozvoj. Při prosazování automobilů, v jejichž pohonu figuruje elektrický pohon, je často skloňována jejich šetrnost k životnímu prostředí, která je mimo jiné reprezentována produkcí CO₂. Elektrický pohon celé řady vozů však využívá pro skladování energie baterie, jejichž výroba produkuje CO₂, jehož podíl není v žádném případě zanedbatelný v celkovém součtu vzniklých emisí při výrobě celého automobilu.

Mezi dostupnými studii, které se zabývají emisemi CO₂ při výrobě baterií do elektromobilů, nepanuje příliš shoda. Není výjimkou, že výsledky se často až násobně liší. Cílem této práce je proto zorientovat se mezi daty jednotlivých nalezených studií a pokud možno co nejvíce specifikovat a rozkrýt okolnosti jejich vzniku.

Je nutné říct, že mezi jednotlivými studii neexistuje žádné jednotné názvosloví a řada z nich je velmi nejednoznačná a specifikace zdrojů dat často zcela chybí. Na veškeré takové případy se však práce snaží upozornit.

Zařazeny byly především studie, které se zabývají Li-ion bateriemi s dvěma různými druhy složení kladných elektrod. Prvním typem je složení značené jako NMC u něž se elektroda skládá z lithia, niklu, manganu a kobaltu. Druhým typem je pak LFP, které je charakterizováno obsahem lithia, železa, kyslíku a fosforu. Oba typy používají grafitové záporné elektrody.

Tyto dva typy byly vybrány, jelikož jsou v současné době nejrozšířenější variantou akumulátorů u elektrických vozidel a také proto, že těmito druhy baterií se zabývá nejvíce publikovaných nezávislých studií. Zajímavé by bylo rovněž zařadit typ LTO, ovšem jedná se o poměrně nově rozšířené složení a v době vzniku této práce nebyly nalezeny žádné dostupné studie, analyzující tento druh elektrod. Mezi další druhy, kterým by bylo vhodné věnovat se v budoucnu, patří především baterie s technologií NCA a také LMO.

Pokud to jednotlivé studie a zdroje umožňovaly, bylo snahou nalézt především konkrétní údaj o energetické náročnosti výroby baterie. Nejlépe v jednotkách [MJ/kWh], kdy megajoule reprezentuje množství potřebné energie pro výrobu baterie vztahované na



kilowatthodinu kapacity baterie. To z toho důvodu, že pro výsledné množství produkce CO₂ je určující především místo jeho vzniku a nikoliv samotný výrobní proces. Bohužel ne všechny studie tuto hodnotu jasně zmiňují, většina z nich se soustředí především na detailní analýzu produkce CO₂ vztažené na váhu baterie [kg CO₂-eq/kg]¹, které jsou dosaženy s modelovými energetickými mixy. Samozřejmě téměř každá studie vychází z odlišných energetických mixů, a proto je samotné porovnání pouze výsledných hodnot produkce CO₂ nepřilíš reprezentativní. Tyto energetické mixy bohužel často nejsou přesně specifikované a přímé srovnání při případném převodu na stejný energetický mix je v podstatě nerealizovatelné. Zpětné dopočítání na MJ/kWh na základě množství CO₂ je také velmi problematické. Při výrobě baterií se totiž realizuje celá řada chemických reakcí a některé z nich produkují i významné množství CO₂ a tím tedy navyšují celkovou sumu výsledných emisí nezávisle na spotřebě elektrické energie.

Souhrn studií, kterými se tato práce zabývá je uveden v Tab. 1. Samostatnou kapitolu (2.4) analýzy tvoří rozbor nástroje GREET 2 Series (Vehicle-Cycle-Model). Výstupní data, která nástroj poskytuje při zachování vstupních parametrů, jsou totiž velmi podobná údajům, které nabízí studie Dai (2019 [1]) – což je v souladu, protože studie je postavena na nástroji GREET 2 Series (Vehicle-Cycle-Model). Nicméně vzhledem k charakteru nástroje (modifikovatelnost vstupů) a skutečnosti, že jeho výsledky pro relevantní nastavení jsou v podstatě obsaženy v jiné studii, není GREET 2 Series (Vehicle-Cycle-Model) v následujícím výčtu (Tab. 1) uváděn.

¹ Jednotka kg CO₂-eq reprezentuje celkové množství vyprodukovaných skleníkových plynů vyjádřených ekvivalentem množství CO₂. Je často vztažena na kilogramy výsledného produktu [kg CO₂-eq/kg], či v případě této práce na kapacitu baterie [kg CO₂-eq/kWh].



Tab. 1.: Výčet studií, které byly zahrnuty do rešerše

Název:	Autor:	Rok:	Původ:	Citace:
Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications	Q. Dai a kolektiv	2019	Argonne, USA	[1]
Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles	G. Majeau-Bettez a kolektiv	2011	NTNU (univerzita), Norsko	[2]
Material and Energy Flows in the Production of Cathode and Anode Materials for Lithium Ion Batteries	J.B. Dunn a kolektiv	2015	Argonne, USA	[3]
Life Cycle Analysis Summary for Automotive Lithiumion Battery Production and Recycling	J.B. Dunn a kolektiv	2016	Argonne, USA	[4]
Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis	H. C. Kim a kolektiv	2016	Ford (USA) a LG Chem (J. Korea)	[5]
Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von Pkw-basierten Verkehrssystemen: Version 1.1	G. Jungmeier a kolektiv	2019	Joanneum research, Německo	[6]
The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries: A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles	M. Romare a kolektiv	2017	IVL, Švédsko	[7]



2 Zdroje studií

Každá ze studií v určité fázi výzkumu sáhla po externích datech z databází a analytických nástrojů. Míra závislosti jednotlivých studií na těchto zdrojích se však liší. Často tyto zdroje sloužily pouze v částech, kdy autoři studií nedisponovali vlastními daty. Naproti tomu jsou výsledky z nástroje GREET zařazovány v některých rešerších přímo vedle výsledků jednotlivých studií – například v Global EV Outlook 2019 [8, s. 152]. To především díky komplexnosti, které je u tohoto nástroje možné dosáhnout. V některých studiích je také k dispozici srovnání dat těchto zdrojů v rámci konkrétních souhlasných parametrů a jejich hodnot. Srovnání vybraných dat z nástroje GREET a databáze Ecoinvent nabízí studie Dai (2019) [1], bližší informace se nachází v kapitole 3.1.5. Bohužel i zde je možné narazit až na několikanásobné rozdíly těchto hodnot, což má samozřejmě vliv na celkovou velikost výsledků studií.

2.1 Ecoinvent

Jedná se o organizaci, která se od roku 2003 zabývá sběrem dat, které se týkají dopadu nejrůznějších průmyslových procesů na životní prostředí. Od posuzování životních cyklů, uhlíkových stop či prověřování deklarácí o environmentálních produktech dle platných ISO norem.

Společnost udržuje svoji databázi aktuální, pomocí pravidelně vydávaných zpráv, které sdružují veškeré proběhlé výzkumy a studie a odkazují na jejich jednotlivé zdroje. Vznikají tak postupně různé verze Ecoinventu. Poslední dostupnou verzí k datu 1. 1. 2020 je Ecoinvent 3.6 z 12. září 2019.

Data Ecoinventu jsou v různých verzích používány jako zdrojové v případě desítek studií. Jedné se v podstatě o databanku hodnot, studií či statistických analýz. Například v případě zájmu o údaj, kolik kilogramů CO₂ vyprodukuje těžba grafitu až do bodu, než je transportován k dalšímu zpracovateli (Cradle-to-gate přístup – od vytěžení do bodu před distribucí stále panenského materiálu) je třeba vyhledat v databázi data týkající se těžby



grafitu a posoudit na konkrétních zdrojích Ecoinventu, zdali jsou vhodné pro uvažovanou problematiku například z hlediska transparentnosti a podmínek při pořizování.

Je na místě také zmínit, že jednotlivé studie používající data Ecoinventu nemusejí být v tuto chvíli aktuální, protože samozřejmě pracovaly s údaji, které byly k dispozici v době jejich vzniku, ale které dnes mohou být v databázi Ecoinventu aktualizované o nejnovější poznatky. Je tedy vhodné vyhledávat ve studiích verze databáze Ecoinventu, ze které autoři vycházeli – například ve formě „Ecoinvent 2.2“.

Přestože deklarovaným cílem společnosti je umožnit lidem přístup ke kvalitním, aktuálním a transparentním datům, přístup do databáze konkrétních dat Ecoinventu je zpoplatněn (v mém konkrétním případě částkou 3800 €).

2.2 GaBi

Společnost GaBi funguje na stejném principu jako Ecoinvent, de facto je to přímá konkurence. Opět se jedná placený zdroj.

Jak však upozorňuje studie IVL (2017) [7, s. 20], v některých případech už jen výběr zdroje dat může vést k velkým rozdílům ve výsledcích. Konkrétně autoři této studie zmiňují zjištěný případ primárního kobaltu, pro jehož produkci uváděla společnost GaBi hodnotu emisí rovnou 90 kg CO₂-eq/kg a Ecoinvent 8,8 kg CO₂-eq/kg, což představuje více než desetinásobný rozdíl hodnot. Je už pak pouze na autorech studie, kterou hodnotu zvolí jako směrodatnou a použijí ji ve své práci.

Bohužel u většiny studií je uvedeno pouze z jakých zdrojů čerpali, ovšem už nejsou podrobně objasněny jednotlivé podrobnosti zisku dat v samotné databázi. Takže i se zaplaceným přístupem do těchto databank, by hledání podmínek, za kterých byly zjištěny hodnoty produkce CO₂ pro stovky kroků výrobního procesu, bylo v podstatě nemožné (za předpokladu, že tyto podmínky jsou vůbec v databázích uváděny).



2.3 GREET

Nástroj GREET je softwarem, který modeluje životní cyklus nejrůznějších procesů. Cílové jsou především data o produkci emisí a spotřebě energií. Tento model vyvinula národní laboratoř Argonne, která spadá pod Ministerstvo energetiky Spojených států amerických.

GREET však není pouze nástrojem, je propojen také s databází studií, které je možné mezi sebou vhodně kombinovat. Ve vztahu k tématu této práce je tedy možné složit si vlastní životní cyklus baterie pro automobil. Je možné vytvořit celkovou stromovou strukturu s volbou jednotlivých kroků od těžby materiálu, přes rafinaci surovin či výrobu jednotlivých komponent baterie, až po finální montáž či provoz baterie. Za těmito kroky je možné dohledat jednotlivé studie, především pracovníků z laboratoří Argonne.

Je tedy nutné zvolit přesně po jednotlivých krocích proces výroby a vymezení jej vstupními podmínkami, které je také možné specifikovat. Poté GREET vyčíslí požadované údaje s důrazem na emise a spotřebovanou energii. Tato variabilita je však při zpětné analýze výsledků GREET problémem. A to především z toho důvodu, že v publikacích, kde jsou prezentována data z GREET mezi výsledky studií, nejsou uváděny jednotlivé konkrétní kroky, které byly v tomto nástroji zvoleny pro dosažení udávaného výsledku.

GREET a celá databáze jsou navíc průběžně aktualizovány, což zpětné zkoumání problematiky bez přesně udaných parametrů původního použitého modelu, v podstatě znemožňuje. K datu 1. 6. 2020 je aktuální verze GREET 2019. GREET je také volně k dispozici na rozdíl od ostatních zdrojů zmiňovaných v této kapitole.

2.4 GREET 2 Series (Vehicle-Cycle Model)

Samostatnou kapitolou nástroje GREET je nástroj nazvaný „GREET 2 Series (Vehicle-Cycle-Model)“. Jedná se o již sestavený životní cyklus automobilu po jednotlivých krocích vytvořený v rámci dvou excelových výpočtových souborů. Pravděpodobně každý krok je postaven na některé z publikovaných studií. Stejně jako u nástroje GREET, je i zde možné volit různé vstupní parametry a vybírat mezi různými možnostmi. Nástroj je také stále aktualizován s tím, že je možné volit i přímo v nástroji data předcházejících verzí.

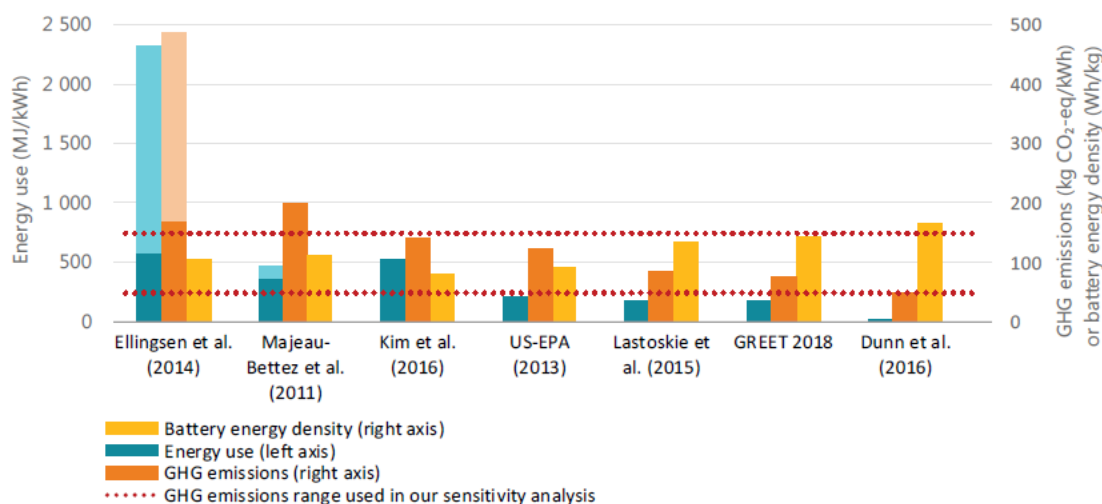


K datu 1. 6. 2020 je aktuální verze 2019. Tento excelový model je také volně přístupný. Proto byla jedna z možných konfigurací tohoto modelu do této práce zařazena. Cílem bylo ověření výsledků, které jsou prezentovány v rámci zprávy Global EV Outlook 2019 [8, s. 152].

2.4.1 Referenční data

Zpráva Global EV Outlook 2019 [8, s. 152] prezentuje grafické srovnání několika studií (Obr. 1). Přičemž pod označením „GREET 2018“, které je uvedeno v tomto grafu, jsou s největší pravděpodobností výsledky z nástroje „GREET 2 Series (Vehicle-Cycle-Model)“ ve verzi 2018. V grafu a ani v jeho popisu bohužel nejsou uvedeny všechny přesné číselné údaje z grafu. Chybí zde především číselný údaj o využití energie, jejíž velikost můžeme pouze odhadovat na základě grafu. Jedná se o tyto údaje:

- Využití energie při výrobě baterie = není přesně uvedeno
- GHG emise (emise skleníkových plynů) při výrobě baterie = 75 kg CO₂-eq/kWh
- Hustota energie baterie = 0,143 kWh/kg (tato hodnota je v popisu grafu uváděna ve špatných jednotkách, v samotném grafu je už však velikost měrné energie baterie vynesena správně)



Obr. 1 - Grafické srovnání studií ze zprávy Global EV Outlook 2019 [8, s. 152]



Jak je uvedeno v úvodu této práce, údaj o využití energie je poměrně zásadní. Ovšem z grafu je možné vyčíst pouze to, že hodnota využití energie se pohybuje mezi 140 – 220 MJ/kWh. Ve zprávě Global EV Outlook 2019 [8, s. 152] je mezi zdroji uvedena také soukromá komunikace s M. Wang, J. Kelly a Q. Dai z laboratoří Argonne. Tyto laboratoře rovněž stojí za nástroji GREET. Od tohoto kolektivu lze dohledat článek Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications [1], kde je možné chybějící hodnotu dohledat a spojit ji s grafem.

- Využití energie při výrobě baterie = 170 MJ/kWh (podle [1])

2.4.2 Vstupní data

V nástroji GREET 2 Series (Vehicle-Cycle-Model) byly zvoleny vstupní parametry tak, aby korespondovaly se zprávou Global EV Outlook 2019 [8, s. 152] a také s článkem Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications [1]. Tyto parametry jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 2).

Tab. 2.: Vstupní data nástroje GREET 2 Series (Vehicle-Cycle-Model) 2018

Materiál elektrody:	NCM111	
Kapacita baterie:	27 kWh	
Váha:	188,7 kg	416 lb
Hustota energie:	0,143 kWh/kg	

Zvolení materiálu elektrody označeného jako NMC111 je varianta, jejíž výroba produkuje nejvíce CO₂ [8, s. 163]. Zároveň je použití této elektrody nejběžnější v rámci USA, Japonska a Evropy [1, s. 2].

Celková váha baterie je uváděna v librách, celkově je tato část modelu GREET pouze v imperiálních jednotkách bez možnosti přepnutí do metrického systému, jako tomu možné v jiných částech modelu GREET. Tento údaj o hustotě energie je odhadem postaveným na základě dalších studií společnosti Argonne.



Hustota energie reprezentuje průměrnou hodnotu převzatou ze zdroje „Autonomie MY2010“, který se však nepodařilo dohledat. Hodnota je vztažena ke hmotnosti celé baterie včetně obalu.

2.4.3 Okolnosti zisku výsledků

Pro každý materiál je možné vložit vlastní energetický odhad na jeho těžbu, výrobu a zpracování. A to nikoliv v součtu, ale pro každou část výrobního procesu zvlášť (těžba rudy, mletí, rafinace, pecní zpracování, válcování, zušlechťování a podobně). Společnost Argonne zde uvádí vlastní hodnoty, kdy každá z nich je s uvedením zdroje. Celá řada materiálů jako například - železo, hliník, ocel, olovo, kobalt, nikl, měď, zinek, hořčík, guma, platina, plasty a mnoho dalších je z hlediska výroby detailně rozebráno ve smyslu spotřeby energie a produkce skleníkových plynů.

Takto detailní volby byly ponechány ve výchozím stavu, jak je autoři nabízejí. V tomto případě bylo cílem uchopit tento komplexní nástroj spíše jako studii s jasně danými údaji. Tím, že se jedná o nástroj, je mnoho názvů nejrůznějších pojmů uváděno pouze heslovitě bez dalšího vysvětlení s tím, že podrobnosti nejsou v řadě případů k nalezení ani v upřesňujícím manuálu.

Jedná se však pouze o kalkulaci energetické náročnosti výroby jednotlivých surovin, které představují vstup do výrobního zpracovatelského procesu baterie. Energetická náročnost jednotlivých zpracovatelských kroků výroby všech částí baterie je počítána zvlášť v rámci Montáže baterie.

2.4.4 Energetický mix

Energetický mix není jednotný. U každého materiálu se skladba energetického mixu a spotřeba energií rozebírá samostatně. Dá se předpokládat, že takto detailní parametry jsou získány ze studií především v podmínkách USA.



U některých kategorií je možnost výběru z různých energetických mixů pro různé procesy. Pro těžbu platiny je počítáno s těžbou v jižní Africe, zpracování hliníku probíhá za použití severoamerického energetického „smelter“ mixu, který je specifikován takto:

Uhlí 35,9 %	Hydroenergie 52,3 %
Jádro 1,4 %	Zemní plyn 10,4 %

Autoři tento krok nijak nekomentují, pro potřeby této práce bylo označení „smelter mix“ chápáno tak, že se jedná o hutní energetický mix, který ve skutečnosti bude odlišný od průměrného energetického mixu v rámci daného státu.

2.4.5 Výsledky

Přehled výsledků je v tabulce (Tab. 3). Objemy produkce skleníkových plynů jsou uváděny v gramech a spotřebovaná energie v jednotkách one-million British Thermal Unit. Oba údaje jsou vztaženy k celkové životnosti automobilu – to proto, že v nástroji je možnost navolit kolik baterií automobil za svoji existenci vystřídá. V případě této práce bylo zvoleno, že automobil využije pouze jednu baterii.

Pro přepočítání byl využit platný převodní vztah (1).

$$1 \text{ mmBtu} = 1\,055,06 \text{ MJ} \quad (1)$$

Tab. 3.: Výsledné data nástroje GREET 2 Series (Vehicle-Cycle-Model) 2018

Celková produkce GHG (skleníkových plynů):	1 959 331 g ²	72 kg CO ₂ -eq/kWh
Celková produkce CO ₂ :	1 790 808 g ³	66 kg CO ₂ -eq/kWh
Celková spotřebovaná primární energie:	29,088 mmBtu ⁴	1 136,65 MJ/kWh
Z toho na montáž baterie:	0,161 mmBtu/kWh ⁵	170 MJ/kWh

² Hodnota převzata z výpočtového excel souboru, list „Battery_Sum“, buňka H246

³ Hodnota převzata z výpočtového excel souboru, list „Battery_Sum“, buňka H244

⁴ Hodnota převzata z výpočtového excel souboru, list „Battery_Sum“, buňka H227

⁵ Hodnota převzata z výpočtového excel souboru, list „Vehi_Inputs“, buňka B132



2.4.6 Porovnání

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.4 - cílem bylo prověření výsledků, které jsou prezentovány v rámci zprávy Global EV Outlook 2019 [8, s. 152]. Především zjistit za jakých okolností vznikly a odkud pocházejí. Bohužel přes veškerou snahu nebylo dosaženo naprosté shody. Porovnání je k dispozici v tabulce níže (Tab. 4)

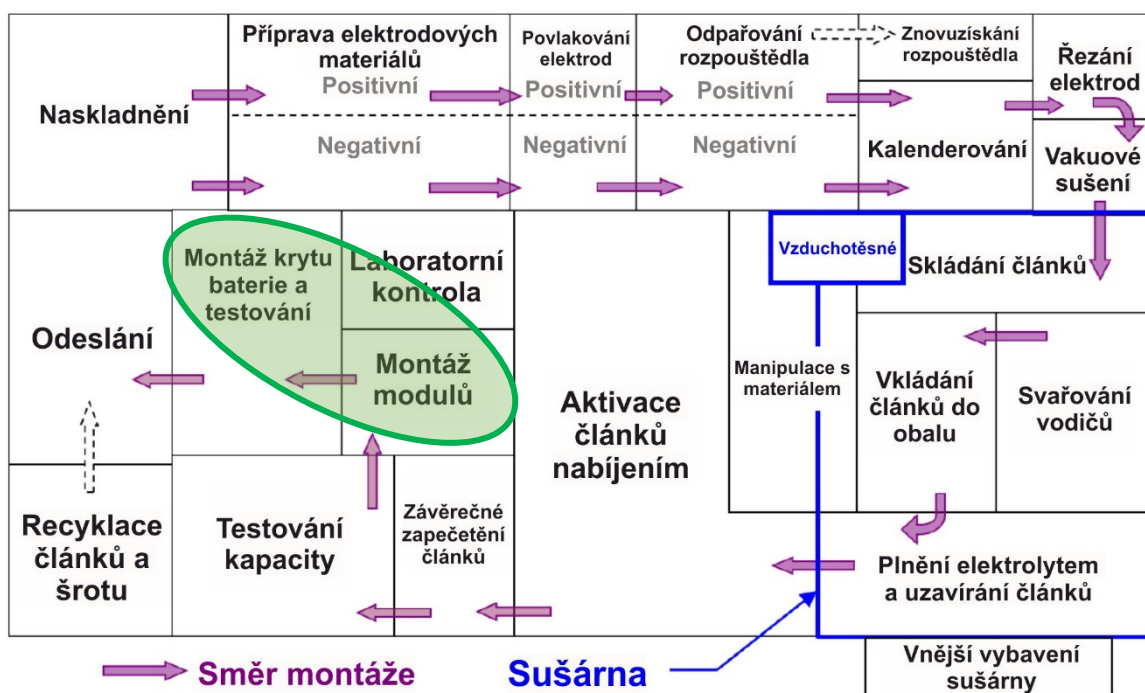
Tab. 4.: Porovnání výsledných hodnot Global EV Outlook 2019 a GREET 2018

		Global EV Outlook 2019 [8, s. 152]	Výsledky při vlastní analýze nástroje GREET 2 Series (Vehicle-Cycle-Model) 2018 [9]
1.	Celková produkce GHG (skleníkových plynů):	75 kg CO ₂ -eq/kWh	72 kg CO ₂ -eq/kWh
2.	Hustota energie baterie:	0,143 kWh/kg	0,143 kWh/kg
3.	Celková spotřebovaná primární energie:	170 MJ/kWh	1 136,65 MJ/kWh
4.	Z toho na montáž baterie:	neudáváno	170 MJ/kWh

Hodnoty v řádcích 1 a 2 jsou srovnatelné. Zásadní rozpor ovšem nastává v případě 3. řádku. Je nutné dodat, že explicitní hodnota 170 MJ/kWh byla převzata z Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications [1] (více v kapitole 2.4.1). Tato, anebo velmi blízká hodnota, však koresponduje s grafickým znázorněním v Global EV Outlook 2019 [8, s. 152]. Proto je ve srovnání uváděna. Řádek 4 představuje vyčíslení primární energie, která je potřeba na montáž baterie. Tento řádek je zde uveden především kvůli zajímavé shodě, přestože po prověření zdrojů nic nenasvědčuje tomu, že by zde došlo k mylnému převzetí tohoto údaje. Hodnota 170 MJ/kWh uváděná v GREET 2 Series (Vehicle-Cycle-Model) 2018 [9] (čtvrtý sloupec tabulky) je v kontextu pouhé montáže baterie nebývale vysoká i na poměry primární energie. Tato hodnota je převzata ze studie Material and Energy Flows in the Materials Production, Assembly, and End of Life Stages of the Automotive Lithium Ion Battery Life Cycle [10] z roku 2012 a byla stanovena výpočtem. Autoři zde specifikují proces montáže baterie, pro který je toto vyčíslení platné (Obr. 2). Složení procesu je následující:



- a) Příprava materiálů elektrod
- b) Povolování elektrod
- c) Povrchová úprava elektrod (tzv. Calendaring)
- d) Dělení elektrod
- e) Plnění článků elektrolytem a jejich uzavírání
- f) Formation cycling (první nabití a vybití vyrobené baterie)
- g) Montáž jednotlivých modulů
- h) Montáž modulů do jednoho celku – konečná baterie



Obr. 2 - Specifikace montáže baterie (v originálu „Battery assembly“) převzata a přeložena ze zdrojové studie [10, s. 33] nástroje GREET 2 Series (Vehicle-Cycle-Model) 2018

Je nutné dodat, že i v rámci americké angličtiny je takovéto chápání pojmu „Battery Assembly“ silně zavádějící. Dle Cambridge Dictionary [11] má být výraz „Assembly“ chápán, jako proces, kdy jsou jednotlivé části skládány do jednoho celku. V případě této práce



bychom tak tedy chápali především montáž hotových modulů baterie do jednoho celku (na Obr. 2 v zeleném kroužku). Nikoliv v podstatě celkovou procesní stránku výroby (není zde započítána produkce vstupních surovin jednotlivých procesů).

Okolnosti původu převzaté hodnoty 170 MJ/kWh ze studie Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications [1] jsou uvedeny v samostatné kapitole 3.1.



3 Zkoumané studie a vědecké články

Tato kapitola obsahuje samostatné rozborů jednotlivých analyzovaných studií.

3.1 Qiang Dai a kolektiv (2019)

Studie Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications [1] je zařazena především kvůli návaznosti na zprávu Global EV Outlook 2019 [8, s. 152], která odkazuje na soukromou komunikaci s Q. Dai a zbytkem autorského kolektivu. Tento kolektiv je spojen s laboratořemi Argonne v USA a tedy i s modelem GREET.

Autoři zmiňují, že studie Ellingsen a kolektiv (2013) [12] a Majeau-Bettez a kolektiv (2011) [2] už nemusí být aktuální, kvůli rychlému rozvoji tohoto odvětví v posledních letech. Předpokládají, že data získaná na reálných provozech, byla pořízena v době, kdy továrny nebyly plně optimalizovány a jejich výroba neběžela v maximálních výrobních kapacitách.

Autoři použili model GREET ve verzi 2018 a věnují se bateriím s elektrodou o složení NMC111, která v době studie byla nejprodávanější v USA, Japonsku a Evropě. Na základě dat ze skutečného provozu vyčíslili primární energetické nároky jednotlivých výrobních kroků.

3.1.1 Vstupní data

Studie byla realizována na baterii, jejíž parametry jsou uvedeny v tabulce níže (Tab. 5).

Tab. 5.: Vstupní data studie Q. Dai (2019) [1]

Materiál elektrody:	NMC111
Kapacita baterie:	23,5 kWh
Váha:	165 kg
Hustota energie:	0,143 kWh/kg
Počet článků:	140
Elektrický náboj článku:	46 Ah
Podoba obalu článků:	Prismatický



3.1.2 Okolnosti zisku výsledků

Veškeré výsledky jsou přepočítávány na 1 kWh. Montáž jednotlivých modulů baterie do jednoho celku je uvažována jako plně manuální práce a není vůbec započítávána. Autoři uvádí referenci ve studii Ellingsen (2013) [12], kdy vyčíslení spotřeby na tento krok bylo velmi nízké a v celkovém kontextu zanedbatelné.

Autoři používají přístup „Cradle to gate“, který začíná těžbou surových materiálů z přírodních ložisek a končí v momentě, kdy celek funkční baterie opouští brány továrny.

Data o produkci jednotlivých částí či surovin jsou použity z databáze modelu GREET.

Značný podíl na celém výrobním procesu, jak z hlediska spotřeby energie, tak z hlediska produkce skleníkových plynů, nese výroba elektrodového prášku NMC111. Z celkového množství to představuje 36,6 % spotřebované energie a 39,1 % vyprodukovaných skleníkových plynů. Data o výrobě elektrodového prášku byla získána v roce 2018 u jednoho z předních čínských výrobců, který patří mezi 5 největších dodavatelů NMC technologie. Tento výrobce bohužel není jmenován.

Získaná data produkce prášku NMC111 byla porovnána s výsledky některých kalkulací Majeau-Bettez (2011) [2]. Například proces precipitace⁶ spotřeboval v reálném provozu 42,6 MJ tepla na 1 kg produktu. Pro tento krok Majeau-Bettez a kolektiv (2011) nevyčísil žádné energetické výdaje. Dále při procesu kalcinace⁷ bylo spotřebováno 25,2 MJ elektřiny pro dosažení 1 kg produktu. Majeau-Bettez a kolektiv (2011) pro srovnatelný proces kalcinace počítali s hodnotou 0,55 MJ. Výrobce také uvedl, že proces kalcinace se musí v praxi několikrát opakovat oproti postupům, které uvádí dostupná literatura. Avšak toto jsou pouze dva vybrané příklady, které autoři uvádí.

Dalším aspektem, který autoři zmiňují, je hospodaření s odpadem při velkovýrobě. Uvádí příklad čištění odpadní vody od amoniaku, které může představovat až 45 % spotřebovaného tepla. S takovými energetickými výdaji údajně mnoho studií postavených na laboratorních simulacích a kalkulacích nepočítá. Konkrétní případy však neuvádějí.

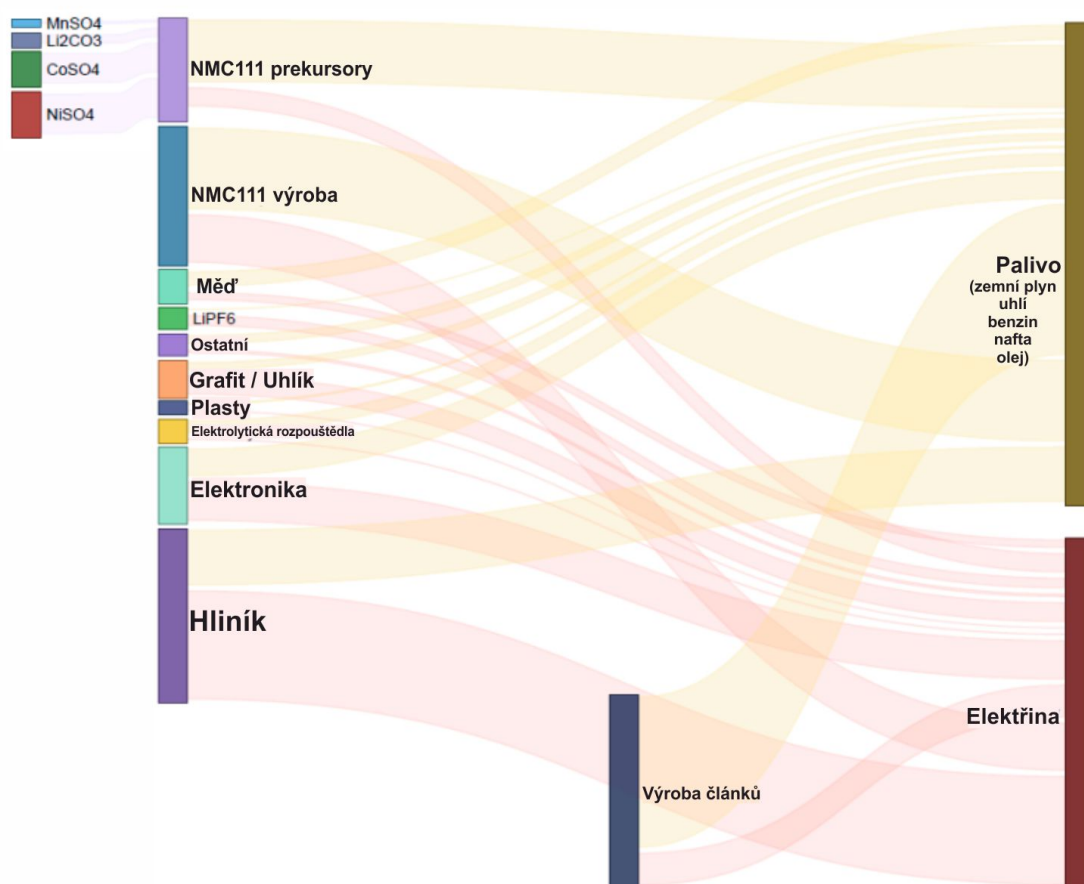
⁶ Precipitace nebo také srážení je reakce, při které v roztoku vzniká sraženina.

⁷ Kalcinace je proces, který spočívá v rozkladu směsi při vysoké teplotě. Jedna z látek se odloučí přeměnou do plynného skupenství a druhá zůstane tuhá. Kalcinace probíhá například při pálení vápna.



Zmíněno je také to, že při velkovýrobě elektrodového prášku platí, že výroba ve velkých objemech vychází mnohem výhodněji a efektivněji.

Data z výroby bateriových článků byla pořízena v roce 2017 a opět pocházejí od čínské společnosti, která patří mezi 10 největších dodavatelů Li-ion baterií na světě. Vzhledem k vysokému objemu produkce může být energetická náročnost výroby, v přepočtu na jednu baterii, nižší než u menších výrobců. Výrobní linka byla uvedena do provozu v roce 2016 a využívá pro svůj chod především páru a elektřinu. Kapacita výroby činila 40 000 kusů článků o napětí 3,7 V o náboji 43 Ah denně. Což dle autorů znamená roční produkci v objemu 2 GWh. Z udaných dat to ovšem spíše vypadá na 1,72 GWh. Rozdělení využití energie dle autorů demonstruje přiložený graf (Obr. 3). Hnědý sloupec vpravo reprezentuje využití paliv jako zemní plyn, uhlí či nafta. Červený sloupec vpravo dole reprezentuje využití elektřiny.



Obr. 3 – Grafické zpracování využití energie ze studie Dai (2019) [1] - přeloženo



3.1.3 Energetický mix

Poté, co studie vyčísluje jednotlivé energetické nároky procesů, které pochází z čínské továrny, pracuje dále s variantou, že výroba baterií se nachází v USA a jsou použity suroviny dostupné na americkém trhu. Americké podmínky totiž dokáže simulovat model GREET, díky kterému je toto vyčísleno. Pro výrobu elektřiny je použito následujícího energetického mixu USA:

Uhlí 32,7 %	Hydro energie 7,7 %
Zemní plyn 29,8 %	Větrná energie 6,4 %
Jaderná energie 20,6 %	Ostatní 2,7 %

Ovšem autoři uvádí, že pro určité procesy jsou použity specifické energetické mixy. Například v případě tavení hliníku v Severní Americe pochází 81 % využívané energie z hydroelektráren. Jak už bylo řečeno v kapitole 2.4.3 – společnost Argonne disponuje detailními analýzami pro celou řadu surovin, které jsou použity při výrobě baterií a pro každou surovinu jsou zohledněny specifické podmínky využití energie různého původu, který často neodpovídá průměrnému energetickému mixu USA.

Dále zde samozřejmě mají vliv také chemické procesy a uvolňování nejrůznějších sloučenin samotnou chemickou reakcí. Je k dispozici srovnání studií z hlediska použité chemie pro přípravu elektrodové pasty. Autoři této studie, vycházeli z dat GREET

Popřípadě je uveden příklad produkce kobaltu v Kongu a niklu v Rusku. Při zpracování obou kovů vzniká velké množství oxidu siřičitého (SO₂). Nicméně jelikož v Kongu v podstatě chybí chemický průmysl, tamní zpracovatelské závody údajně SO₂ zachycují, protože jej využívají pro produkci kyseliny sírové. Škodlivý SO₂ tedy není vypouštěn do ovzduší v takové míře jako například při zpracování vytěženého niklu v Norilsku v Rusku. Tam vypouštění SO₂ do ovzduší nijak nezamezují. Naproti tomu do Konga se pro účely těžby dováží značné množství paliv, které urazí větší vzdálenost než například v rámci Ruska.



3.1.4 Výsledky

Skleníkové plyny (GHG) a CO₂ zde nejsou rozlišeny. Výsledky uvedené v následující tabulce (Tab. 6) odpovídají hodnotám, které byly získány z nástroje GREET 2 Series (Vehicle-Cycle-Model) 2018 [9] a které jsou uvedeny v kapitole 2.4.5. To bylo předpokládáno, protože autoři studie využívali při výpočtech nástroj GREET a sami figurují ve výzkumu v laboratořích Argonne, které nástroj GREET vytvořily. Data o spotřebě energie byla získána při provozu vytíženém na 75 %.

Tab. 6.: Výsledné data studie Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications [1]

Celková produkce GHG (skleníkových plynů):	72,9 kg CO ₂ -eq/kWh
Celková spotřebovaná primární energie na výrobu baterie:	1 126 MJ/kWh
Z toho primární energie na výrobu článků:	170 MJ/kWh
Podíl páry na výrobě článků:	140 MJ/kWh
Podíl elektřiny na výrobě článků:	30 MJ/kWh

Na základě těchto dat je možné označit graf ze zprávy Global EV Outlook 2019 [8, s. 152] (více v kapitole 2.4.1) za zavádějící, protože v legendě tohoto grafu není nikde uvedeno, že prezentovaná data se týkají pouze výroby článků. Naopak, jeho popis spíše svádí k chápání uvedených dat v kontextu celkového rozsahu výroby baterií. Tento graf dokonce kombinuje data vztažená k výrobě celkové baterie (GHG – emise skleníkových plynů) a data, která odpovídají pouze výrobě článků (využití energie).

3.1.5 Porovnání

Autoři srovnávají objemy produkce se studií Ellingsen (2013), u které není přesně specifikován výrobce článků. Odhadují, že to musel být výrobce s objemem produkce pod 1 GWh, protože celkový světový trh s automobilovými bateriemi dosahoval 5 GWh v roce 2012 a 10 GWh v roce 2013. Ellingsen (2013) údajně rovněž přiznala, že efektivita továrny, ze které získávali data, by mohla být zvýšena. Zatímco v případě studie Dai (2019) měl



výrobce provést řadu opatření pro efektivní využití energie, tak aby snížil cenu článků samotných.

Dále je zde komentář ke studii Kim (2016) [5], který uvádí, že továrna LG Chem v Ochangu byla schopna v roce 2014 vyprodukovat až 200 000 baterií což představovalo kapacitu 3 - 4 GWh ročně. Ovšem Jižní Korea měla v roce 2014 vyprodukovat celkem pouze 70 000 baterií, což naznačuje, že závod v Ochangu nebyl patrně plně využit. Protože výrobní závod nevyráběl pravděpodobně ani na polovinu své kapacity, výroba byla méně efektivní a závěry této studie tedy mohou být vyšší.

Připojeno je také srovnání dat produkce CO₂ při zpracování materiálů či produkci jednotlivých komponent baterie (Obr. 4). Levý sloupec reprezentuje data z nástroje GREET a dva sloupce napravo představují data dvou verzí Ecoinventu. Na tomto srovnání jde bohužel opět vidět, že násobné rozdíly poměrně zásadních vstupních dat nejsou výjimkou.

Bateriový materiál / Komponenta	GREET 2018	Ecoinvent 2.2	Ecoinvent 3.1
<i>kg CO₂e/kg Bateriového materiálu</i>			
Kobalt / primární *	27.0	8.3 [44]	9–10 [37]
Nikl / primární *	8.1	7.8–10.9 [44]	10 [37]
Grafit	4.9		1–2 [37]
Hliník / primární	8.4	12.2 [44]	
Měď / primární	3.1	2.3–5.0 [44]	3–5 [37]
LiPF ₆	12.2		27 [37]
NMP (N-Methyl-2-pyrrolidone)	5.1		5–6 [37]
<i>kg CO₂e/kg Bateriová komponenta</i>			
BMS (Řídicí systém baterie)	26.5	23.3 [10]	
Katodová pasta	14.8	7.1 [10]	
Anodová pasta	4.7	6.0 [10]	

Obr. 4 – Srovnání dat GREET a Ecoinvet ze studie Dai (2019) [1] - přeloženo

3.2 Majeau-Bettez a kolektiv (2011)

Studie Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles [2] je čistě teoretická. Je založená



na kvantifikování jednotlivých částí baterie, které jsou dle dostupných databází, studií a laboratorních pokusů přepočítány na produkci CO₂.

Tvůrci vše počítají pro smyšlenou baterii, která má dodávat do hnacího traktu energii 50 MJ. To vše bez jakýchkoliv omezení ze strany hnacího ústrojí, nicméně včetně veškerých vlastností baterie jako je kapacita, možné vybití baterie, délka životního cyklu a ztráty. Číslo 50 MJ bylo zvoleno na základě studie (Axsen, J.; Burke, A.; Kurani, K.; 2008 [13] – výsledek 0,53 MJ/km), která vyčíslovala enviromentální dopady plug-in hybridu (PHEV) na jeden ujetý kilometr. 50 MJ tedy přibližně koresponduje se 100 ujetými kilometry.

Studie vychází z práce publikované autory Rydh & Sandén (2005) [14] – především, co se týče vyčíslování energetických odhadů jednotlivých částí baterie, přičemž dělení výrobního procesu baterie je čerpáno z databáze Ecoinvent 2.2 (2010). Uplatňován je přístup shora dolů. Práce přesně zmiňuje data pro každou součást NiMH a Li-ion NCM (oxid nikl-cobalt-manganu) a LFP (Lithium-železo-fosfát) baterie. Cílem autorů také bylo vycházet ze zdrojů, které by byly nezávisle srovnatelné s tehdy aktuální studií Notter (2010) [15], aby bylo srovnání dosažených výsledků co nejobektivnější.

3.2.1 Vstupní data

Díky tomu, že veškeré výpočty jsou závislé pouze na hodnotě 50 MJ (energie, kterou má baterie dodávat do hnacího traktu), autoři neřeší základní vstupní data baterií, jako u ostatních studií. K dispozici jsou pouze údaje o zvoleném složení elektrod a o uvažované hustotě energie, což však pro účely této práce postačuje a chybějící údaje byly pro přehlednost dopočítány. Vše je uvedeno v tabulce níže (Tab. 7).

Tab. 7.: Vstupní data studie Majeau-Bettez (2011) [2]

Materiál elektrody:	NMC442	LFP
Kapacita baterie (dopočteno):	13,89 kWh	13,79 kWh
Váha (dopočteno):	124 kg	156,7 kg
Hustota energie:	0,112 kWh/kg	0,088 kWh/kg



Podle dostupných zdrojů autoři pracovali se složením NMC442, které liší od NMC111 poměry jednotlivých složek. Napříč všemi studiemi, které jsou předmětem analýzy této práce, však autoři neřeší různé druhy technologie elektrody NMC – například NMC111, NMC442 a v dnešní době také NMC622 či NMC712. V kontextu všech odlišností, které jednotlivé studie mezi sebou mají, lze předpokládat, že přesný poměr složení elektrody nehraje takovou roli.

3.2.2 Okolnosti zisku výsledků

Výsledná čísla sledují dělení na následující body (toto dělení odpovídá databázi Ecoinvent 2.2; Hischer; 2010):

- a) Elektřina spotřebovaná baterií během životního cyklu – *Electricity consumed by battery*
- b) Ztrátová elektřina při nabíjení a vybíjení – *Battery use*
- c) Výroba baterie a komponent
- d) Výroba kladné elektrodové pasty
- e) Výroba záporné elektrodové pasty
- f) Výroba elektrolytu
- g) Výroba separátoru
- h) Výroba obalu článku (zde PET) – *Module & battery casing*
- i) Výroba krytu článku (Hliník) – *Cell container*
- j) Výroba systému řízení baterie – BMS – *Battery management systém*
- k) Výroba základu záporné elektrody
- l) Výroba základu kladné elektrody

Jsou patné dvě skupiny tohoto dělení – pracovní období baterie, které představují body a) a b) a dále samotná výroba baterie - body c) až l). Pro potřeby této práce, která se zaměřuje na výrobní fázi baterie jsou tedy body a), b) nad rámec tématu. Recyklace ani



žádná jiná operace podobného charakteru není ve výrobním cyklu baterie uvažována, především proto, že v době vzniku studie se ve větší míře nic z takového nepraktikovalo.

V každém z uvedených bodů c) až l) autoři studie řeší veškeré procesy, které jsou třeba k dosažení dané komponenty či produktu. Od rafinace materiálu po dopravu, a to do takových detailů, kdy řeší nejčastější uspořádání továren, například když se dva procesy odehrávají v praxi často na jednom místě. Části výroby jsou uvažovány ve východní Asii a přeprava je kalkulována do Evropy. Pro veškeré části potřebné k dosažení výsledku daného kroku výroby, je uváděno číselně množství jednotlivých surovin, komponent a paliva. Díky tomu je tato studie velmi věrohodná a transparentní, pakliže pomineme neveřejný zdroj v podobě Ecoinventu a obecný problém těchto databází, který spočívá v odlišnosti hodnot pro shodné procesy.

Je počítáno s použitím panenského materiálu (*virgin material*) - tzn. materiálu, který nikdy nebyl nijak využitý, rafinovaný či jinak zpracovaný. Studie zahrnuje dopravu tohoto materiálu z místa těžby do místa zpracování. Jakoukoliv úpravu tohoto panenského materiálu považují autoři za součást výroby (*manufacturing*) a zbavují se tak mezičlánku v podobě „zpracování materiálu“ (*material processing*), který používají některé další studie a který je často předmětem nejasností, protože není jasná hranice mezi výrobou a zpracováním materiálu. Tomu se autoři této studie záměrně vyhýbají a počítají se vším v plné šíři.

V případě těžby panenského materiálu (*production from cradle to gate*), se autoři studie přiklání ke studii Rydh and Sandén (2005) [14], která vyčíslila energetickou náročnost těžby v případě Li-ion baterií na hodnotu 1,6 MJ/kWh, což tvořilo 43,2 % celkové spotřebované energie. Celkově spotřebovaná energie dle studie Rydh and Sandén činila 3,7 MJ/kWh. Tato studie však pracuje s myšlenkou, že veškeré nevyráběné materiály musí být dosaženy pomocí recyklace nebo prostřednictvím panenských materiálů, což bohužel není běžné.

Tato studie dosáhla nejvyšších hodnot hlavně díky pojivu v elektrodové pastě, kterým byl tetrafluoretylen, který je vysoce emisně náročný. Z tohoto důvodu studie IVL (2017) [7]



vyřadila práci Majeau-Bettez et al (2011) ze svého výběru průměrovaných hodnot jako příliš přehnanou.

3.2.3 Energetický mix

Pro vyjádření elektrického mixu autoři využili průměrné evropské hodnoty z Union for the Coordination of Transmission of Electricity (UCTE), konkrétně však vyčíslení neuvádí. Tento zdroj navíc bohužel nebyl dohledán, nicméně dle jiného oficiálního zdroje - European Environment Agency [13] byl průměrný elektrický mix v roce 2011 následující:

25,5 % Uhlí	27,5 % Jádro
22,3 % Zemní plyn	2,24 % Oleje
21,5 % Obnovitelné zdroje	1,1 % Ostatní

Elektrina tvoří 75 % veškeré spotřebované energie v rámci výroby baterie. Autoři uvažují, že její výroba probíhá s účinností 35 %. Zbýlých 25 % spotřebované energie je vyráběno s uvažovanou účinností téměř 100 %.

3.2.4 Výsledky

Výsledky studie jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 8). Hodnoty v prvním řádku ohledně produkce CO₂ jsou převzaty přímo ze zkoumavé studie Majeau-Bettez (2011) [2], avšak údaje v dalších řádcích jsou převzaté ze studie Ellingsen (2013) [12]. To z toho důvodu, že v samotné zkoumané studii se výsledky uvádí pouze v jednotkách MJ/kg a to pouze z hlediska potřebné primární energie. Přepočítání na jednotky MJ/kWh výrazně komplikuje také fakt, že autoři nestanovili žádnou pevnou hmotnost baterie ani její energii. Stejně tak převod primární energie na energii elektrickou je další neznámou v přepočtech. Ani po několikanásobných soukromých přepočtech udávaných hodnot pro potřeby této práce nebylo dosaženo výsledků, jaké jsou uváděny ve studii Ellingsen (2013) [12] či ve zprávě IVL (2017) [7]. Jelikož však sám Guillaume Majeau-Bettez byl členem autorského



týmu studie Ellingsen (2013), považujeme tato data jako platná, a proto jsou uvedeny v tabulce (Tab. 8).

Tab. 8.: Výsledky studie Majeau-Bettez (2011) [2]

	NMC442	LFP
Celková produkce CO ₂ při výrobě baterií:	200 kg CO ₂ -eq/kWh	250 kg CO ₂ -eq/kWh
Z toho produkce CO ₂ při výrobě článků:	56-70 kg CO ₂ -eq/kWh	
Celková spotřebovaná elektřina na výrobu článků:	371-473 MJ/kWh	

3.3 Dunn a kolektiv (2015)

Studie Material and Energy Flows in the Production of Cathode and Anode Materials for Lithium Ion Batteries [3] staví především na základech v podobě četných předešlých prací tohoto autora a kolektivu. Studie je vydána laboratořemi Argonne, které stojí za nástrojem GREET a také modelem BatPac. Jedná se o model, který na základě vstupních parametrů (vlastnosti materiálu katody, potřebné množství komponent pro určitý výkon, konstrukce baterie, výsledná cena při známých technologiích či předpokládané zlepšení efektivity – v případě této studie plánováno pro rok 2020⁸) navrhne možnou reálně uskutečnitelnou podobu baterie v budoucnu. Na základě toho jsou pak vyčísleny jednotlivé části baterie.

Práce se zabývá výrobou katod z materiálů NCM (oxid nikel-cobalt-manganu), LFP (Lithium-železo-fosfát), LCO (oxid Lithium-cobaltu) a LMR-NMC (pokročilejší lithiová katoda s vysokým počtem prvků). Nicméně technologie LCO a LMR-NMC nebyly v době vypracování studie příliš rozšířené (v komerčním sektoru prakticky vůbec), a proto autoři upozorňují na velké nedostatky například v dostupných datech o technikách přípravy těchto materiálů. Z těchto důvodů a také z hlediska porovnatelnosti s ostatními studiemi, které se technologiemi LCO a LMR-NMC nezabývají, se ani v této práci jimi nebudeme zabývat.

⁸ Zde je zajímavé srovnání se současností jako potvrzení, že tento odhad byl například v případě hustoty měrné energie správný. Hodnotu 0,16 kWh/kg disponuje například baterie aktuálního automobilu BMW i3 (model 2019). Více v kapitole 3.6.5.



3.3.1 Vstupní data

Velikost uvažovaných baterií byla zvolena na základě modelu BatPaC. Výsledná podoba baterií, se kterou studie počítala, je uvedena v tabulce níže (Tab. 9). Jedinou dopočtenou hodnotu představuje hustota energie baterie. Autoři tuto hodnotu udávali pouze na úrovni specifikace elektrodového materiálu, který byl vstupem do modelu BatPac. Nicméně pro účely této práce má význam hustota energie pouze ve vztahu k jmenovitým hodnotám kapacity a váhy baterie.

Tab. 9.: Vstupní data studie Dunn (2015) [3]

Materiál elektrody:	NMC	LFP
Kapacita baterie:	28 kWh	28 kWh
Váha baterie:	170; 180 kg	230 kg
Hustota energie (dopočteno):	0,16 kWh/kg	0,12 kWh/kg
Článků v baterii:	96	100

3.3.2 Okolnosti zisku výsledků

Údaje o energetických a materiálových tocích jsou stanovené na základě výpočtů. Není počítáno s kroky jako například zpracování odpadů, vyhřívání pracovišť či manipulace okolo výrobních zařízení v rámci závodu.

Co se týče zdrojů, jedná se však v podstatě o samostatnou větev vlastních výzkumů laboratoří Argonne v podání podobných kolektivů. V prvotních studiích tohoto kolektivu je možné dohledat práci Rydh & Sandén (2005) [14], která se zabývala především vyčíslováním energetické náročnosti jednotlivých kroků. Nicméně tato studie z roku 2015 již není s prací Rydh & Sandén (2005) [14] přímo spojena.

Autoři dělí proces na tyto body:

- a) Těžba rud a ropy
- b) Zpracování materiálů, výroba
- c) Transport vytěženého materiálu do místa zpracování
- d) Transport podsestav baterie do montážního závodu



- e) Příprava elektrodových materiálů
- f) Povlakování elektrody
- g) Calendaring (povrchová úprava elektrod, vyhlazení)
- h) Dělení elektrod
- i) Plnění článků elektrolytem a uzavírání článků
- j) Formation cycling (první nabití a vybití vyrobené baterie)
- k) Montáž jednotlivých modulů
- l) Montáž modulů do jednoho celku – konečná baterie
- m) Recyklace

Navzdory tomu, že autoři studie uvádějí dělení celého procesu výroby, zabývají se pouze výrobou jednotlivých elektrod což představují body a) až h) s tím, že body a) až d) jsou uvažovány pouze pro potřeby elektrod. Nikoli celou baterií (například autoři nepočítají s těžbou a zpracováním hliníku pro potřeby krytu baterie, protože to nesouvisí s tématem elektrod). Jelikož však produkce elektrod spotřebuje řádově okolo 41,5 % primární energie [7, s. 16], je i tento údaj o výrobě elektrod určitým způsobem vypovídající. Zvláště uvažujeme-li energii spotřebovanou na výrobu elektrod jako hlavní proměnnou a veškeré další části baterie jako víceméně konstantní hodnoty.

Pro obě složení elektrod (NCM) a (LFP) jsou detailně rozepsány kroky uvažované výroby. Bohužel však tyto kroky nejsou ve většině případů nijak specifikovány – například konkrétním množstvím jednotlivých surovin a je uveden pouze koncový výsledek jedné fáze výroby. V případech, kdy je více možností zisku dané suroviny, vybírali autoři studie způsob, pro který měl model GREET svoje vlastní data. Není zde například uveden interval dat, který by zahrnoval veškeré známé způsoby zpracování. Při vyčíslování spotřeby energie některých částí se přiklání k metodologii studie Majeau-Bettez (2011) [2]. Při výrobě grafitu ovšem autoři popisují, že postup ze studie Majeau-Bettez (2011) [2] pro tuto část výrobního



procesu nebyl vyhovující. Nicméně v porovnání výsledných hodnot není rozdíl příliš znatelný.

U výroby NCM uvádí, že při zpracování kobaltu nepočítali s elektrolýzou, ovšem je pravděpodobné, že v praxi by mohla být využita pro dosažení větší čistoty potřebných sloučenin.

3.3.3 Výsledky

Tabulky výsledků studie jsou poměrně chudé na množství dat. Přestože v celé studii jsou ve většině případů uváděny hodnoty jak v angloamerické měrné soustavě, tak v jednotkách SI, v závěru toto chybí a jsou uvedeny pouze v angloamerických jednotkách. Proto byl nutný následující převod zachycený v tabulkách níže.

Pro LFP technologii zpracovali autoři dvě možné alternativy – hydrotermální (31 mmBtu/ton, zkratka HT) a produkci z tuhého stavu (2.53 mmBtu/ton, zkratka SS). Pro elektrodu NMC zase autoři zpracovali výsledky pro dvojí váhu baterií (170 a 180 kg). Tyto dvě skutečnosti pak tvoří rozptýl hodnot.

Převod na srovnatelné jednotky byl proveden kombinací převodního vztahu (1) a převodního vztahu (2) do výsledné formulace (3):

$$1 \text{ ton (short ton)} = 907,18 \text{ kg} \quad (2)$$

$$\frac{\text{mmBtu} \cdot 1055,06}{907,18} = \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \quad (3)$$

Výsledky studie včetně převodu jsou uvedeny v tabulce níže (Tab. 10).

Tab. 10.: Výsledky studie Dunn (2015) a přepočítání na MJ/kg

Výsledná primární energie z produkce elektrod:	mmBtu/ton	MJ/kg
NMC	135	157
LFP (hydrotermální produkce – HT)	48	56
LFP (produkce z pevného stavu – SS)	39	45



Nicméně pro potřeby této práce bylo nutné ještě převést hodnoty v jednotkách MJ/kg na jednotky MJ/kWh což reprezentuje následující tabulka (Tab. 11).

Tab. 11.: Přepočet výsledků na srovnatelné hodnoty v jednotkách MJ/kWh

Spotřebovaná primární energie pro produkci elektrod baterií:	MJ/kWh
NMC (baterie 170 kg):	953
NMC (baterie 180 kg):	1009
LFP (produkce z pevného stavu – SS):	373
LFP (hydrotermální produkce – HT):	459

Autoři studie však výslovně neuvádí, zda se jedná o vyčíslení primární energie. Avšak vzhledem k postupu, který je ve studii zachycen se jedná s největší pravděpodobností o vyčíslení primární energie. To by odpovídalo také využití modelu GREET a napojení na laboratoře Argonne.

3.4 Dunn a kolektiv (2016)

Jedná se o článek Life Cycle Analysis Summary for Automotive Lithiumion Battery Production and Recycling [4] od obdobného autorského kolektivu jako v případě předchozí studie Dunn (2015) [3]. Autorský kolektiv je tedy složen z vědeckých pracovníků laboratoří Argonne v USA.

Na začátku článku je zmíněno, že výroba baterií je vnímána jako problém z hlediska spotřeby energie. To však autoři popírají a uvádí, že toto je skutečným problémem pouze v případě malých továren s nízkým objemem produkce. Dále uvádí, že recyklace materiálů elektrod může výrazně zmírnit dopady baterie na životní prostředí a zároveň je i ekonomicky atraktivní pro všechny druhy elektrod. Naproti tomu je však později uvedeno, že recyklace baterií je v době publikování zprávy prozatím v začátcích a její prosazování by mělo být vymezeno legislativou a zároveň by se mělo ekonomicky podpořit.



3.4.1 Vstupní data

Studie se zaměřuje na tři různé druhy elektrod – NMC, LFP a LMR-NMC. Poslední jmenovaný druh je však stále ve vývoji a sériově se nepoužívá. Autoři ho však vidí jako nejmenší zátěž pro životní prostředí. To do jisté míry kontrastuje s tím, že autoři uvádí, že nejlepší výsledky se dosahuje při velkovýrobě, což však v době publikace této zprávy nebyl případ složení LMR-NMC. Konstrukce baterie počítá s tím, že jedna elektroda je druhu NMC či LFP a druhá z grafitu. Vstupní data baterií jsou uvedena v následující tabulce (Tab. 12).

Tab. 12.: Vstupní data článku Dunn (2016) [4]

Materiál elektrody:	NMC	LFP
Kapacita baterie:	28 kWh	28 kWh
Váha:	170 kg	230 kg
Hustota energie:	0,165 kWh/kg	0,122 kWh/kg
Váha elektrody dle druhu:	47,6 kg	55,2 kg
Váha grafitové elektrody:	30,6 kg	34,5 kg

3.4.2 Okolnosti zisku výsledků

Článek je stručný a neuvádí v podstatě žádné podrobnosti, ohledně vzniku prezentovaných dat. V podstatě jsou prezentovány pouze výsledky, kterých tento kolektiv dosáhl. Výsledky jsou pouze rozděleny v rámci následujících témat:

- a) Náročnost výroby elektrod z energetického a emisního hlediska
- b) Náročnost výroby celku baterie z energetického a emisního hlediska
- c) Porovnání emisní náročnosti vozidel s různými bateriemi na ujetý kilometr
- d) Způsoby recyklace a produkce oxidů síry z recyklace
- e) Ceny elektrod a materiálů pro jejich výrobu

Pro účely této práce mají význam pouze body a) a b). Z nich také pochází výsledky uváděné v následující kapitole.



Autoři provedli cradle-to-gate analýzu za pomoci nástroje GREET, kdy zkoušeli různé varianty chemického složení elektrod, které poté zkombinovali s modelem BatPaC, jež simuluje složení baterie. Pojem cradle-to-gate autoři podrobněji nespecifikují, ovšem vzhledem k vazbě na nástroj GREET a předchozí studie, lze soudit, že i zde autoři začínají od těžby surovin až po hotovou baterii.

3.4.3 Energetický mix

Energetický mix, se kterým bylo dosaženo výsledné produkce emisí, není uveden. Lze se domnívat, že se jednalo o mix vztažený k podmínkám USA.

3.4.4 Výsledky

Výsledky jsou uváděny v absolutních hodnotách bez přepočtu na kWh. Pro účely této práce však byly přepočteny. Autoři nikde neuvádí, zda se v případě energie jedná o výslednou spotřebovanou elektřinu, anebo jde o vyčíslení formou primární energie. Autorský kolektiv (srovnatelný s autory předchozí studie) a také realizování studie pomocí nástroje GREET, napovídá, že uváděné energetické údaje reprezentují množství primární energie. Na druhou stranu pokud předchozí práce Dunn (2015) [3] uvádí výsledky ve vyčíslení primární energie, po přepočtu na elektřinu (konverzní faktor 0,35) by to souhlasilo s výsledky Dunn (2016) [4] – to reprezentuje výpočet (4) s dosazením (5). Je velmi nepravděpodobné, že v případě, že by se jednalo v obou případech o hodnoty primárních energií, by se výsledky v rámci jednoho roku natolik změnily.

$$A + B = C \sim D = E \cdot f$$

$$A = \text{Energie na výrobu elektrody NMC}$$

$$B = \text{Energie na výrobu grafitové elektrody}$$

$$C = \text{Součet } A + B \tag{4}$$

$$D = \text{Součin } E \cdot f$$

$$E = \text{Energie na výrobu elektrod z Tab. 10 dle studie Dunn (2015) [3]}$$

$$f = 0.35 \text{ (součinitel pro zisk elektrické energie z primární energie)}$$



Po dosažení:

$$238 + 98 = 336 \sim 333,6 = 953 \cdot 035 \quad (5)$$

Obdobně lze najít takový souhlas pro LFP elektrody. Tato úvaha nás tedy vede k tomu, že údaje o spotřebě energie v následující tabulce (Tab. 13) se týkají spotřebované elektrické energie a nikoliv primární energie. S jistotou to však říct nelze.

Tab. 13.: Výsledky článku Dunn (2016) [4]

	NMC	LFP
Energie na výrobu elektrody dle druhu:	140 MJ/kg	40 MJ/kg
Po přepočtu:	238 MJ/kWh	79 MJ/kWh
Produkce CO ₂ při výrobě elektrody dle druhu:	9,9 kg CO ₂ -eq /kg	2,6 kg CO ₂ -eq /kg
Po přepočtu:	17 kg CO ₂ -eq/kWh	5 CO ₂ -eq/kWh
Energie na výrobu grafitové elektrody:	90 MJ/kg	
Po přepočtu:	98 MJ/kWh	110 MJ/kWh
Produkce CO ₂ při výrobě grafitové elektrody:	5,3 kg/kg	
Po přepočtu:	5,8 kg CO ₂ -eq/kWh	6,5 CO ₂ -eq/kWh
Celková produkce CO ₂ při výrobě baterií:	1 400 kg CO ₂ -eq	1 200 kg CO ₂ -eq
Po přepočtu:	50 kg CO ₂ -eq/kWh	43 kg CO ₂ -eq/kWh
Celková spotřebovaná energie na výrobu článků:	20 000 MJ	18 000 MJ
Po přepočtu:	714,3 MJ/kWh	642,9 MJ/kWh

3.4.5 Porovnání

Tato zpráva byla mimo jiné zařazena také proto, že figuruje v grafickém srovnání Global EV Outlook 2019 [8, s. 152] (viz. Obr. 1) a v tomto srovnání reprezentuje velmi nízké výsledky, především co se týče spotřebované energie. Z této grafiky je patrné, že uváděná hodnota spotřebované energie pro studii Dunn (2016) [4] je určitě ještě méně než 85 MJ/kWh.

Takovou hodnotu však zpráva Dunn (2016) [4] vůbec neprezentuje, naopak uváděné hodnoty této zprávy jsou mnohem vyšší – viz. Tab. 10. S grafem Global EV Outlook 2019 [8, s. 152] (Obr. 1) korespondují pouze hodnoty hustoty energie (0,165 kWh/kg) a celkových



vyprodukovaných emisí (50 kg CO₂-eq/kWh). Není to však první rozpor s tímto grafem, obdobný problém je řešen i v rámci kapitoly 2.4.6.

3.5 Ellingsen a kolektiv (2013)

Studie Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack [12], se zabývá pouze baterií s elektrodou NCM. Jedná se o transparentní studii, která je často uváděna v nejrůznějších přehledech a srovnáních (například Global EV Outlook 2019 [8]). Samotné autorské týmy dalších studií často srovnávají své výsledky právě se studií Ellingsen (2013) [12].

3.5.1 Vstupní data

Vstupní data jsou uvedena v Tab. 14. Jediná přepočtená hodnota je hustota měrné energie. Ve studii autoři uvádí její hodnotu ve vztahu ke hmotnosti článků (0,174 kWh/kg) – pro potřeby této práce byla tato hodnota vztažena ke hmotnosti celé baterie.

Tab. 14.: Vstupní data studie Ellingsen (2013) [12]

Materiál elektrody:	NMC111
Kapacita baterie:	26,6 kWh
Váha:	253 kg
Hustota energie:	0,105 kWh/kg
Jmenovité napětí článků:	3,65 V
Elektrický náboj článku:	20 Ah

3.5.2 Okolnosti zisku výsledků

Data pocházejí z roku 2012 a jejich zdrojem je norská společnost Miljøbil Grenland zabývající se výrobou baterií pro BEV (battery electric vehicles). Tato společnost poskytla údaje o spotřebě energie za 18měsíční období.



Transport silniční a lodní dopravou byl vyčíslen na základě běžných tras ze zdrojů Ecoinventu (2010). Výroba baterií probíhala ve východní Asii a jednotlivé celky byly transportovány do uvedené firmy v Norsku.

Studie následuje dělení a celkovou formu práce Majeau-Bettez (2011) [2] ovšem ve většině s vlastními daty a s jiným použitým pojivem (polyvinyl fluorid). Právě pojivo bylo u práce Majeau-Bettez (2011) [2] problematické a výrazně zvyšovalo výslednou produkci CO₂.

Výroba baterie je rozdělena do 5 základních částí:

- a) Bateriové články (anoda, katoda, separátor, elektrolyt a obal článku)
- b) Kryt baterie (schránka, upevnění, rám)
- c) Systém řízení baterie
- d) Chladicí systém
- e) Finální montáž jednotlivých částí do celku baterie

Dále jsou pak tyto body rozpracovány na 49 částí a ty pak do dalších 360 dílčích celků, ze kterých se baterie skládá. Z těchto 49 částí je 42 zabezpečeno daty z norské firmy, 5 bylo převzato ze studie Majeau-Bettez (2011) [2] a 2 z práce Notter (2010) (Ecoinvent 2.2) [15]. Veškeré tyto části byly kvantifikovány a poté přepočítány na potřebnou energii či produkci CO₂. Autoři detailně zmiňují použité postupy a jednotlivé kvantifikace v detailních tabulkách.

3.5.3 Energetický mix

Elektrický mix, se kterým autoři pracovali, byl stanoven takto:

46 % Uhlí	33 % Jádru
14 % Zemní plyn	4,4 % Oleje
1,67 % Obnovitelné zdroje	0,044 % Ostatní

Pouze pro část - e) Finální montáž jednotlivých částí do celku baterie, která probíhala v Norsku, byl použit norský energetický mix. Ovšem tato část celého procesu je v kontextu celkového výsledku zanedbatelná – představuje pouze 0,014 MJ/kWh spotřebované



elektřiny. Hodnota je tak nízká z toho důvodu, že tato část výroby baterie je tvořena především manuální prací a jediný energeticky náročnější proces představuje svaření krytu baterie.

3.5.4 Výsledky

V případě spotřebované elektrické energie autoři pracují se třemi hodnotami – dolní mezní hodnotou (LBV), asymptotickou hodnotou (ASV) a průměrnou hodnotou (AVV). Přičemž dolní mez byla stanovena z měsíce s nejvyšší efektivitou energie 18měsíčního výběru. Je zajímavé, že právě tuto nejnižší hodnotu (LBV) autoři studie berou jako směrodatnou hodnotu. Přitom jen průměrná hodnota (AVV) v jejich výzkumu je výrazně vyšší. Bohužel zcela chybí údaj o maximálních hodnotách, kterých v analýze výsledků dosáhli. Údaje o energetické náročnosti výroby jsou bohužel dostupné pouze pro výrobní část - a) Bateriové články (anoda, katoda, separátor, elektrolyt a obal článku). Hodnoty ohledně produkce emisí se už týkají celé baterie v rámci všech výrobních částí. Celkový přehled výsledků je uveden v následující tabulce (Tab. 15).

Tab. 15.: Výsledky studie Ellingsen (2013) [12]

Celková produkce CO ₂ (LBV – dolní mezní hodnota):	172 kg CO ₂ -eq/kWh
Celková produkce CO ₂ (ASV – asymptotická hodnota):	240 kg CO ₂ -eq/kWh
Celková produkce CO ₂ (AVV – průměrná hodnota):	487 kg CO ₂ -eq/kWh
Spotřebovaná elektrická energie na výrobu bateriových článků (LBV):	586 MJ/kWh
Spotřebovaná elektrická energie na výrobu bateriových článků (ASV):	960 MJ/kWh
Spotřebovaná elektrická energie na výrobu bateriových článků (AVV):	2318 MJ/kWh
Produkce CO ₂ na výrobu článků (LBV):	107 kg CO ₂ -eq/kWh
Produkce CO ₂ na výrobu článků (ASV):	175 kg CO ₂ -eq/kWh
Produkce CO ₂ na výrobu článků (AVV):	424 kg CO ₂ -eq/kWh

3.6 Kim a kolektiv (2016)

Studie Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis [5] pracuje s baterií běžně vyráběného automobilu Ford Focus



Electric. Výsledky této studie vychází z reálného provozu dvou výrobních závodů na tyto baterie.

3.6.1 Vstupní data

Vstupní data studie reprezentují skutečné hodnoty baterie pro vůz Ford Focus Electric. Jejich přehled je uveden v následující tabulce (Tab. 16).

Tab. 16.: Vstupní data studie Kim (2016) [5]

Materiál elektrody:	NMC/LMO
Kapacita baterie:	24 kWh
Váha:	303 kg
Hustota energie:	0,08 kWh/kg
Jmenovité napětí článků:	3,7 V
Počet článků:	430

3.6.2 Okolnosti zisku výsledků

Výchozím bodem studie je stav, kdy je k dispozici čistý materiál, použitelný pro přímou výrobu katody, anody a dalších součástí. To znamená, že studie nezahrnuje těžbu materiálu a jeho zpracování.

Výrobní proces autoři rozdělili na dvě části:

- a) Výroba článků v Jižní Koreji
- b) Výroba celku baterie v USA

V rámci části a) jsou vyráběny bateriové články společností LG Chem ve městě Ochang v Jižní Koreji, která patří k jednomu z největších dodavatelů Li-ion baterií pro automotive průmysl. Sběr dat v této společnosti probíhal po celý rok 2014, od ledna do prosince, přičemž za celou tuto dobu byl vyroben přibližně 1 milion článků pro vůz Ford Focus Electric.

Část b) se týká výroby kompletního celku baterie, který je následně montován do automobilů. Tento proces probíhá ve společnosti Piston Group v Michiganu (USA). Je do



něj zahrnuta výroba elektrického systému baterie, krytu, systému řízení baterie (BMS – *Battery management systém*) a systému kontroly teploty baterie.

Pro výpočet produkce CO₂ z výroby systému řízení baterie – BMS – *Battery management system* – je použito modifikovaného nástroje GREET 2014. Jedná se o software na bázi excelových výpočtů pro vyčíslení produkce CO₂ výrobního procesu a životního cyklu určitého výrobku. Jedná se o produkt společnosti GREET. Pro vyčíslení produkce CO₂ z hliníkových a měděných částí baterie bylo využito korejské národní databáze, kterou udržuje tamní ministerstvo obchodu, průmyslu a životního prostředí. Přičemž tato databáze zohledňuje lokální korejské podmínky. Pro produkci CO₂ při výrobě elektrolytu bylo využito informací z databáze společnosti IHS Markit (Process Economics Program), která sdružuje informace a data o chemických výrobních procesech.

Ostatní přepočty na produkci CO₂ u jednotlivých procesů výroby baterie jsou pak postavené na základě databáze Ecoinvent 3.1. Jednalo se například i o válcování a lisování kovových a hliníkových částí, tažení měděných drátů, vstřikování a vyfukování plastových součástí či transport z Jižní Koreji do USA.

3.6.3 Energetický mix

Přepočty na emise CO₂ byly pro část a) vypočítány z průměrného korejského energetického mixu, který je uveden takto:

39 % Uhlí	30 % Jádru
22 % Zemní plyn	5 % Oleje
4 % Obnovitelné zdroje a ostatní	

V případě části b) bohužel není energetický mix konkrétně vyčíslen, pouze je zde odkaz na U.S. Emissions což je statistika společnosti EIA, která shromažďuje oficiální informace o energetice od americké vlády. Podle údajů na jejich webu [16], měl energetický mix v USA v roce 2014 toto složení:

38,14 % Uhlí	27,46 % Zemní plyn
--------------	--------------------



13 % Obnovitelné zdroje

0,73 % Oleje

19,23 % Jádru

1,44 % Ostatní

3.6.4 Výsledky

Výsledky studie jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 17). Celková spotřebovaná primární energie byla přepočtena pro potřeby této práce z MJ/kg na MJ/kWh.

Tab. 17.: Výsledky studie Kim (2016) [5]

Celková produkce CO ₂ :	140 kg CO ₂ -eq/kWh
Celková spotřebovaná primární energie na výrobu baterie:	120 MJ/kg
Po přepočtu:	1515 MJ/kWh

3.6.5 Porovnání

Při srovnávání výsledků s ostatními studiemi, poukazují autoři na fakt, že v řadě teoretických studií je počítáno s vyšší měrnou hustotou energie baterií, než jaká je v reálných podmínkách běžně dosahována. Konkrétně se jedná o studie Notter (2010; elektroda LMO) [15], Dunn (2012, elektroda LMO) [10], EPA (2013; elektrody LMO+NCM) [17] Majeau-Bettez (2011; elektroda NCM) [2]. Tyto studie počítají s měrnou hustotou energií baterie v rozmezí 0,1-0,13 kWh/kg, které jsou však znatelně vyšší než ve skutečnosti u baterie Fordu Focus Electric, kde je měrná hustota energie baterie 0,08 kWh/kg.

Konkrétně u studie Notter (2010) [15] je počítáno s hodnotou 0,114 kWh/kg u automobilu, který by měl jízdní dynamikou a velikostí simulovat přibližně Volkswagen Golf. Autoři této studie však upozorňují, že to je mnohem vyšší, než je udávaná jmenovitá hodnota u reálně vyráběné baterie VW e-Golf – ta ve skutečnosti činí 0,076 kWh/kg.

Zde je nutné také přihlídnout k datu publikování studie. Pro srovnání uveďme, charakteristiky vozu BMW i3 v souvislosti s výrobními roky:

- a) BMW i3 (2019), váha baterie přibližně 270 kg, jmenovitá kapacita 42 kWh [18]
- b) BMW i3 (2013), váha baterie 230 kg, jmenovitá kapacita 22 kWh [19]

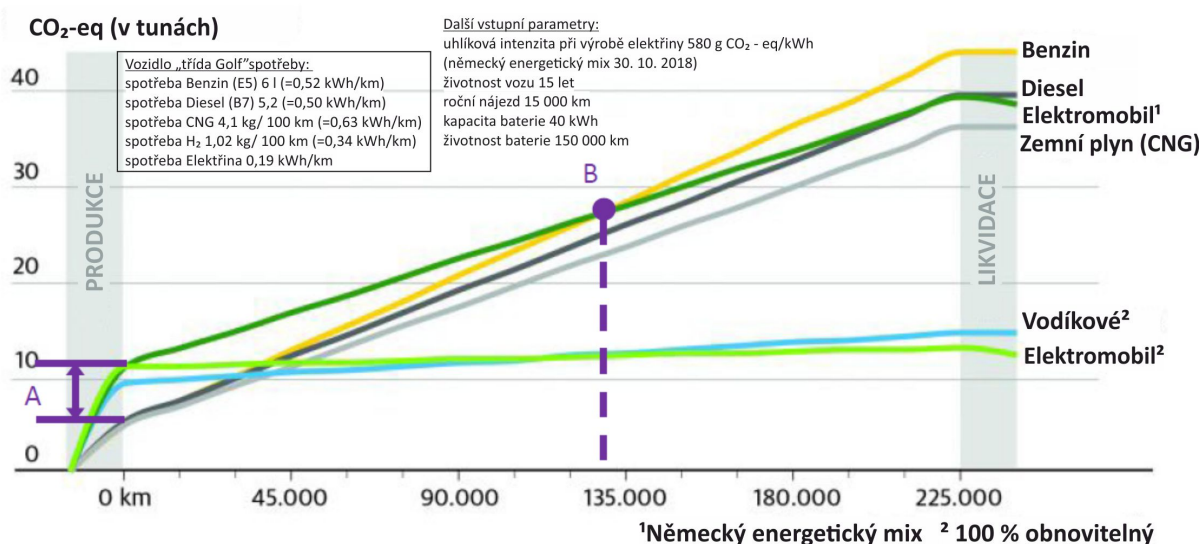


V případě a) je hustota měrné energie 0,16 kWh/kg a v případě b) 0,096 kWh/kg. Obě tyto reference jsou však novějšího data než publikované studie, které autoři jmenují. Nicméně jasně naznačují, že v době publikování zmíněných studií byla jejich udávaná data nadhodnocená vůči tehdy běžné sériové výrobě.

Toto však ukazuje, že i přepočítání emisí CO₂ či množství spotřebované energie na kWh baterie může být značně zkreslený, pokud autoři studií počítají s vyšším výkonem baterií, než je ve skutečnosti běžné.

3.7 Joanneum research (2019)

V roce 2019 vydala německá společnost Joanneum research rozsáhlou zprávu s názvem *Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von Pkw-basierten Verkehrssystemen: Version 1.1* [6] (což lze přeložit jako „Odhadované emise skleníkových plynů a spotřeba primární energie během životního cyklu automobilů“). Tato zpráva byla zaštitěna organizacemi ÖAMTC, FiA a ADAC. A právě ADAC v jednom ze svých článků [20] prezentuje výsledky Joanneum research prostřednictvím následujícího grafu (Obr. 5), který dobře ilustruje problematiku náročnosti výroby baterií pro elektromobily.



Obr. 5 – Graf emisní náročnosti vozidel během jejich životního cyklu [20] - přeloženo



Na vodorovné ose je uváděn nájezd vozidel v kilometrech. Na ose svislé produkce CO₂ v tunách. Jednotlivé barevné křivky reprezentují automobily s různým druhem pohonu. Pro potřeby této práce je zajímavá především tmavě zelená křivka, která reprezentuje elektromobil (napájený z německé sítě – německý energetický mix) a žlutá křivka, která reprezentuje automobil se zážehovým (benzinovým) motorem. V bodě B se tyto křivky protnou. Jedná se o bod, kdy se vyrovnají vyprodukované emise CO₂ obou druhů pohonu a v tomto případě je dále úspornější elektromobil. Je však jasně patrné, že sklon křivek ve střední části grafu v době nájezdu kilometrů je velmi podobný a to, kdy se tyto křivky protnou, významně ovlivňuje jejich startovací pozice, spočívající ve vyprodukovaných emisích CO₂ při výrobě – rozdíl emisí CO₂ při výrobě elektromobilu a automobilu se zážehovým motorem reprezentuje bod A. Například v případě automobilu s dieselovým motorem je průsečík s elektromobilem až v naprostém závěru předpokládané životnosti a rozdíl v ušetřených emisích CO₂ je minimální.

A právě pro účely této práce bylo zjištěno, jaká data použili v Joanneum research pro znázornění výrobní části elektromobilu v uvedeném grafu (Obr. 5). Autoři odkazují na výsledky studie Elligsen (2013) [12]. Uvádí, že odhadovaná spotřeba energie na výrobu baterií je přibližně 163 kWh/kWh, což je po přepočtu hodnota 586 MJ/kWh (která je uváděna i dále v grafech). Je vhodné připomenout, že se jedná o dolní mezní hodnotu, kterou naměřili autoři práce Elligsen (2013) [12]. Zdá se také, že autoři německé studie tuto hodnotu berou jako celkovou pro výrobu kompletní baterie, zatímco ve zdrojové studii, je dle odpovídajícího názvosloví tato hodnota uváděna pouze pro výrobu bateriových článků. Tyto články však dále pokračují k montáži s chladicími a řídicími systémy a následnému balení do vybraného obalu. Bohužel tento krok není detailněji okomentován, a proto vše nasvědčuje buď zjednodušení v případě německé studie nebo zanedbání zbytku výrobního cyklu baterie.

Dále je zde uvedeno, že v budoucnu, při masivní sériové výrobě baterií bude možné dostat se pod hodnotu 16 kWh/kWh (58 MJ/kWh) s odkazem na studie Dai (2017) [21] a Ahmed (2016) [22]. Studie Dai (2017) [21] není předmětem analýze této práce, ovšem z rozboru



nejnovější studie stejného autorského kolektivu - Dai (2019) [1] v kapitole 3.1 takto nízká hodnota nevyplývá.

3.8 IVL (2017)

Studie *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries: A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles* [7] je odlišná od ostatních zkoumaných prací. Vznikla především jako rešerše dostupných studií na téma životních cyklů baterií elektromobilů s důrazem na produkci CO₂ během jejich výroby. Jak je uvedeno v úvodu této studie – mezi publikovanými studiemi na toto téma nepanuje přílišná shoda ani žádné jednotné názvosloví a výsledky jsou často rozporuplné a nejasné. Proto má smysl je srovnávat a dávat je do určitého kontextu.

Práce IVL (2017) [7], tedy neprezentuje žádná nezávislá data z vlastního výzkumu, ale přináší závěry vytvořené na základě srovnání dostupných prací na toto téma.

3.8.1 Výsledky

Nedá se jednoznačně určit, z kolika studií autoři vycházeli a na základě jakých přesně daných předpokladů vyvodily své závěry. Konkrétněji se zabývají přibližně desítkou studií. Stanovené hodnoty nejsou průměrné, ale spíše pravděpodobné. O věrohodnosti, reálnosti a rozsahu jednotlivých studií autoři rozhodovali jednotlivě. Analýza je detailní a autoři upozorňují na celou řadu nejasností – ať už se jedná o vymezení výrobních fází, různé energetické mixy, zdroje jednotlivých studií v databázích či nejednoznačné názvosloví napříč studiemi. Různé studie vykazovaly různé nejasnosti, a proto pravděpodobně autoři hodnotili jednotlivé výsledky studií zvlášť podle okolností vzniku.

Z pohledu této práce chybí ve studii IVL (2017) [7] pouze podrobnější analýza zohledňující vyčíslení energie buď ve spotřebované elektrické energii, či v primární energii. Tato problematika je pouze zmíněna, jako komplikace při srovnání, ale dále není diskutována. Nicméně vzhledem k výsledkům uvedených v následující tabulce (Tab. 18) a ke studiím, které autoři hodnotili se pravděpodobně jedná o spotřebovanou elektrickou energii.



Tab. 18.: Výsledky srovnání IVL (2017) [7]

	NMC	LFP
Celková produkce CO ₂ při výrobě baterií:	150-200 kg CO ₂ -eq/kWh	
Celková spotřebovaná elektrická energie na výrobu baterie:	350-650 MJ/kWh	



4 Grafické porovnání studií

Studie byly porovnány mezi sebou podle spotřebované elektrické energie, měrné energie baterie, váhy a vyprodukovaných emisí z produkce spotřebované elektrické energie.

4.1 Porovnání hlediska spotřebované elektrické energie

Je porovnávána pouze energie na výrobu článků v [MJ/kWh], záměrně bez vlivu různých energetických mixů, které studie obsahují a bez vlivů chemikálií, které produkují velké množství CO₂. Parametry jsou porovnávány bez ohledu na uvažovanou měrnou energii baterií.

Toto srovnání nejvýrazněji komplikuje fakt, zda autoři vyčíslovali energetické nároky výroby v primární energii či v celkové spotřebované elektrické energii. Pro potřeby této práce bylo využito předpokladu, že elektrická energie je vyráběna z primárních zdrojů s 35% účinností – tento údaj je uváděn ve studiích Bettez (2011) [2, s. 28] a Dai (2019) [1, s. 7].

Takto přepočítané výsledky studií jsou označeny v grafu (Obr. 6) hvězdičkou.

V tomto srovnání už nevypadá studie Majeau-Bettez (2011) [2] nejhůře, jako při vyčíslování v tunách CO₂, kdy hodnoty velmi zvyšovalo použité pojivo v podobě tetrafluoretylenu. Naopak, teoretické výpočty tohoto kolektivu se jeví srovnatelné s ostatními. Je ovšem zajímavé, že autoři uvádí totožný výsledek jak pro NMC, tak pro LFP články.

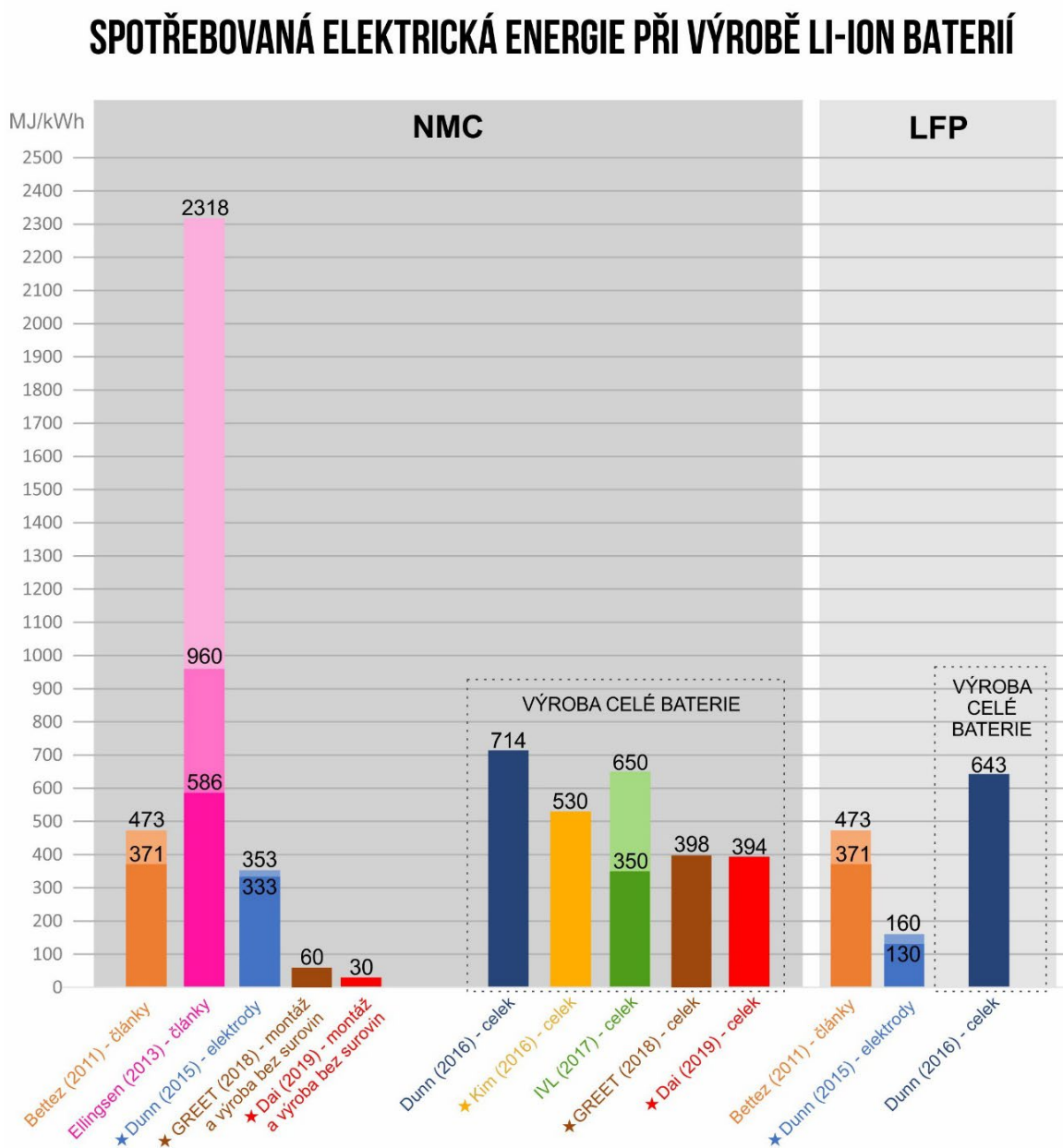
V případě práce Ellingsen (2011) [12] překvapují velké rozptyly hodnot, zvláště v kontextu toho, že autoři považují za relevantní ty nejnižší, přestože z logiky věci by měla být nejpřesnější hodnota asymptotická. Je také vhodné uvést, že jejich nejvyšší hodnota (2318 MJ/kWh) je pouze hodnota průměrná. Maximální hodnotu vůbec neuvádějí. Je škoda, že autoři zpracovali pouze NMC článek. V rámci této práce dosahuje průměrná hodnota studie Ellingsen (2011) [12] zdaleka nejvyšší hodnoty.

Na výsledcích Dunn (2015) [3], Dunn (2016) [4], GREET (2018) [9] a Dai (2019) [1], které v podstatě reprezentují laboratoře Argonne je patrný pokles v rámci vyčíslení náročnosti celé baterie v průběhu let. Je otázkou, jestli je vůbec možné brát GREET (2018) [9] a Dai



(2019) [1] jako dva rozdílné zdroje, protože výsledky obou vycházejí pravděpodobně z velmi podobného základu.

Studie Kim (2016) [5] se svými výsledky tvoří zajímavou nezávislou referenci studiím, které jsou sdruženy pod laboratořemi Argonne.



Obr. 6 – Spotřebovaná elektrická energie při výrobě Li-ion baterií



4.2 Porovnání z hlediska použité měrné energie ve studiích

Je porovnávána měrná energie jednotlivých baterií, se kterou pracovali autoři jednotlivých studií. Nejčastěji je udávána v [kWh/kg]. Pokud je tato hodnota vysoká, znamená to, že je potřeba menší hmota baterie, což přímo ovlivňuje množství surovin a materiálu, na jehož zpracování je potřeba elektrická energie. Tento údaj se s časem zvyšuje, protože výrobci se snaží dosáhnout co nejvyšší měrné hustoty baterií.

Na rozdíly v měrné hustotě energie upozorňuje především studie Kim (2016) [5] (více v kapitole 3.6.5), která ve své práci uvádí reálné hodnoty dvou vyráběných vozů. VW e-Golf s měrnou energií baterie 0,076 kWh/kg a Ford Focus Electric s měrnou energií baterie 0,08 kWh/kg. S druhou uvedenou hodnotou i práce počítá. Z grafu (Obr. 7) je patrné, že tato studie má nejmenší hodnoty měrné hustoty energie.

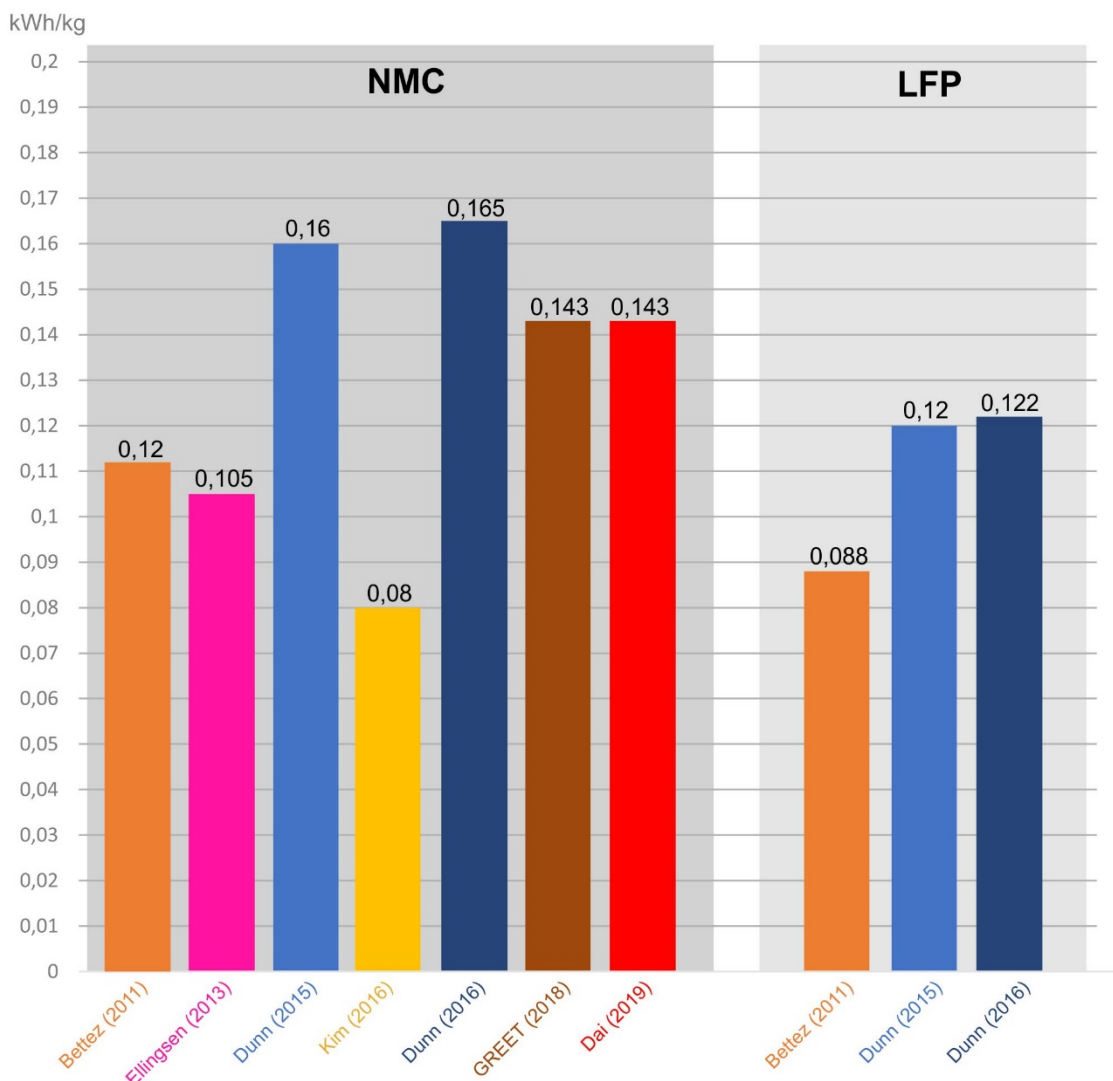
Jako další referenci z nabídky výrobců je ještě možné uvést automobil BMW i3. Jeho první verze z roku 2013 disponovala hustotou energie baterie 0,096 kWh/kg a jeho aktuální verze z roku 2019 má hustotu měrné energie 0,16 kWh/kg.

Přičemž i řada starších studií má hodnoty vyšší. Problém to může být v případě, když jsou takovéto studie v době vydání považovány za aktuální, přičemž jejich hustota měrné energie odpovídá spíše budoucnosti a jsou porovnávány v rámci různých zpráv o elektromobilitě. Na tento údaj, který v podstatě reflektuje realnost baterií, se už ve srovnáních v podstatě nikdo nezaměřuje.

Vyšší hodnoty u starších studií nemusí být nutně špatně, zvláště pokud používají model BatPac společnosti Argonne. Tento software totiž dokáže zahrnout i předpokládaný vývoj baterií – tak tomu bylo například u studie Dunn (2015) [3], která použila modelaci baterie pro rok 2020 (více v kapitole 3.3.1), přičemž při pohledu na dnešní poměry byl tento odhad správný.



MĚRNÁ HUSTOTA ENERGIE BATERÍ



Obr. 7 – Porovnání měrné hustoty baterií ve studiích

4.3 Porovnání spotřebované elektřiny a hmotností baterií

Jestliže měrná hustota energie baterie určitým způsobem reflektuje realitu, u hmotností celku baterie, se kterým studie počítaly, je situace výrazně odlišná. To, že jsou studie několik let staré a v době svého vzniku použily poměrně vysoké hodnoty měrné hustoty energie pro malé kapacity baterií vyústilo v nízké celkové hmotnosti baterií.



Průměrné hodnoty hmotnosti a kapacity baterií zkoumaných studií v rámci této práce jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 19).

Tab. 19.: Průměrné hodnoty hmotnosti a kapacity v rámci této práce

Průměrná váha NMC:	200,6 kg
Průměrná váha LFP:	193 kg
Průměrná kapacita NMC:	24,4 kWh
Průměrná kapacita LFP:	23,3 kWh

Pro potřeby této práce byl vypracován přehled vybraných vyráběných elektromobilů platný k datu 6/2020 – viz. Příloha Tab. 21. Automobily v tabulce jsou seřazeny dle váhy baterií. Lze vidět, že pod vypočítaný průměr studií této práce (Tab. 19) je možné zařadit pouze tři vozy. Byly stanoveny průměrné hodnoty (Tab. 20) v rozsahu celé tabulky (řádky 1.-23.), v rozsahu řádků 1.-11. (vozy do hmotnosti baterie 400 kg) a v rozsahu řádků 4.-11. (vozy s hmotností baterie mezi 200-400 kg).

Tab. 20.: Průměrné hodnoty prodávaných automobilů k datu 6/2020

Průměrná váha v celém rozsahu:	428,8 kg
Průměrná kapacita v celém rozsahu	61 kWh
Průměrná váha v rozsahu 1.-11. řádku:	280 kg
Průměrná kapacita v rozsahu 1.-11. řádku:	37,4 kWh
Průměrná váha v rozsahu 4.-11. řádku:	317,3 kg
Průměrná kapacita v rozsahu 4.-11. řádku:	42,3 kWh

Toto srovnání je zde hlavně proto, že vznikající studie mají zcela opačný trend než reálný stav (viz. Obr. 8) – váhy baterií v nich se neustále snižují, na rozdíl od reálného stavu v automotive průmyslu, kdy se váhy baterií neustále zvyšují. V poslední době se často opakuje názor, že s nastávající velkovýrobou baterií klesají emisní nároky na výrobu jednoho kusu článku (Dai (2019) [1], kapitola 3.1). Avšak v průběhu času také roste počet článků, ze kterých se jedna baterie skládá, protože roste její hmotnost a kapacita. Bohužel



nejsou k dispozici data, aby bylo možné říct, zda pokles produkce emisí při produkci vyrovnává nárůst velikosti baterií.

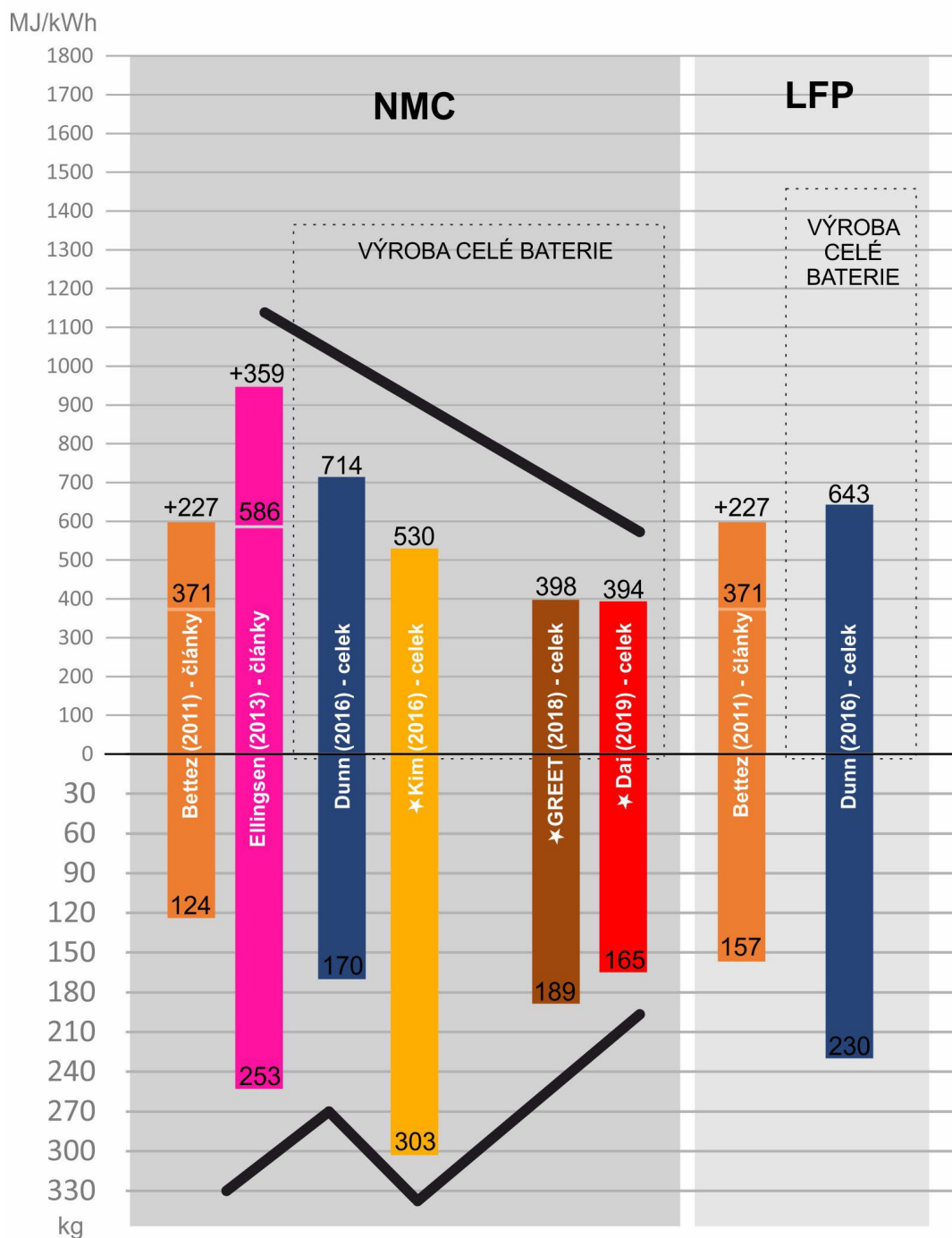
Samozřejmě z těchto důvodů je zde přepočtená spotřebovaná elektřina na kapacitu baterie (MJ/kWh), který má také snižující se tendenci. Nicméně není jasné, zda s narůstající hmotností baterií narůstají lineárně také vyprodukované emise (IVL (2017) [7]). Rostoucí velikost baterie znamená vyšší počet článků (nebo větší články) a také zvětšování pasivních prvků baterie, jako obslužná elektronika, chlazení či samotný kryt baterie. Stejně tak se zatížení baterií vysoké hmotnosti promítne do konstrukce automobilu a dále také do spotřeby energie během jízdy. Avšak studie, které by analyzovaly i větší baterie vyšších kapacit zcela chybí. Vývoj v automotive je rychlejší než na úrovni dostupných výzkumů.

Přiložený graf níže (Obr. 8) dokumentuje stav ve zkoumaných studiích. Pro potřeby tohoto grafu byly hodnoty Bettez (2011) a Ellingsen (2013) uvažovány jako 62 % a byly tedy přepočítány na 100 %. To je provedeno pouze z důvodu přibližného odhadu celkové spotřebované energie (nejen při výrobě článků) a ilustraci trendu. 62% hodnota byla zvolena na základě IVL (2017) [7, s. 16], kde se uvádí, že výroba článků spotřebuje přibližně 62 % primární energie. Nikde jinde v této práci tento předpoklad použit nebyl. Zde je uveden pouze z důvodu rozšíření početní základny studií pro ilustraci klesajícího trendu spotřeby elektrické energie při výrobě baterie. Tento předpoklad byl použit pouze pro nejnižší hodnotu (LBV) studie Ellingsen (2013) – (Tab. 15). Pro ostatní výsledky (ASV, AVV) by toto ani nemělo smysl provádět.

Horní polovina grafu (Obr. 8) reprezentuje spotřebovanou elektrickou energii, dolní polovina grafu celkovou hmotnost baterií ze studií. Černé křivky upozorňují na trend vzorků. Hmotnostnímu trendu se vymyká pouze studie Kim (2016), která ovšem jako jediná dokumentovala celek reálně vyráběné baterie. Od obou trendů se pak odlišují výsledky Bettez (2011).



SPOTŘEBOVANÁ ELEKTRICKÁ ENERGIE PŘI VÝROBĚ LI-ION BATERIÍ VE SROVNÁNÍ S HMTNOSTÍ BATERIÍ



Obr. 8 – Spotřeba elektrické energie (horní polovina grafu) v porovnání s hmotností baterií (dolní polovina grafu)



4.4 Porovnání z hlediska vyprodukovaných emisí CO₂

Spotřeba elektrické energie byla na celkové emise CO₂ přepočítána na základě dat International Energy Agency [23], která uvádí světový průměr produkce CO₂ vztažený na jednu kilowatthodinu pro rok 2018. Tato hodnota je rovna 475 g CO₂ / kWh. Přepoččet proběhl dle platného převodního vztahu (6).

$$1 kWh = 3,6 MJ \quad (6)$$

Dále podle vztahu (7).

$$\left(\frac{MJ}{kWh \cdot 3,6} \right) \cdot 0,475 = \frac{kg CO_2 - eq}{kWh} \quad (7)$$

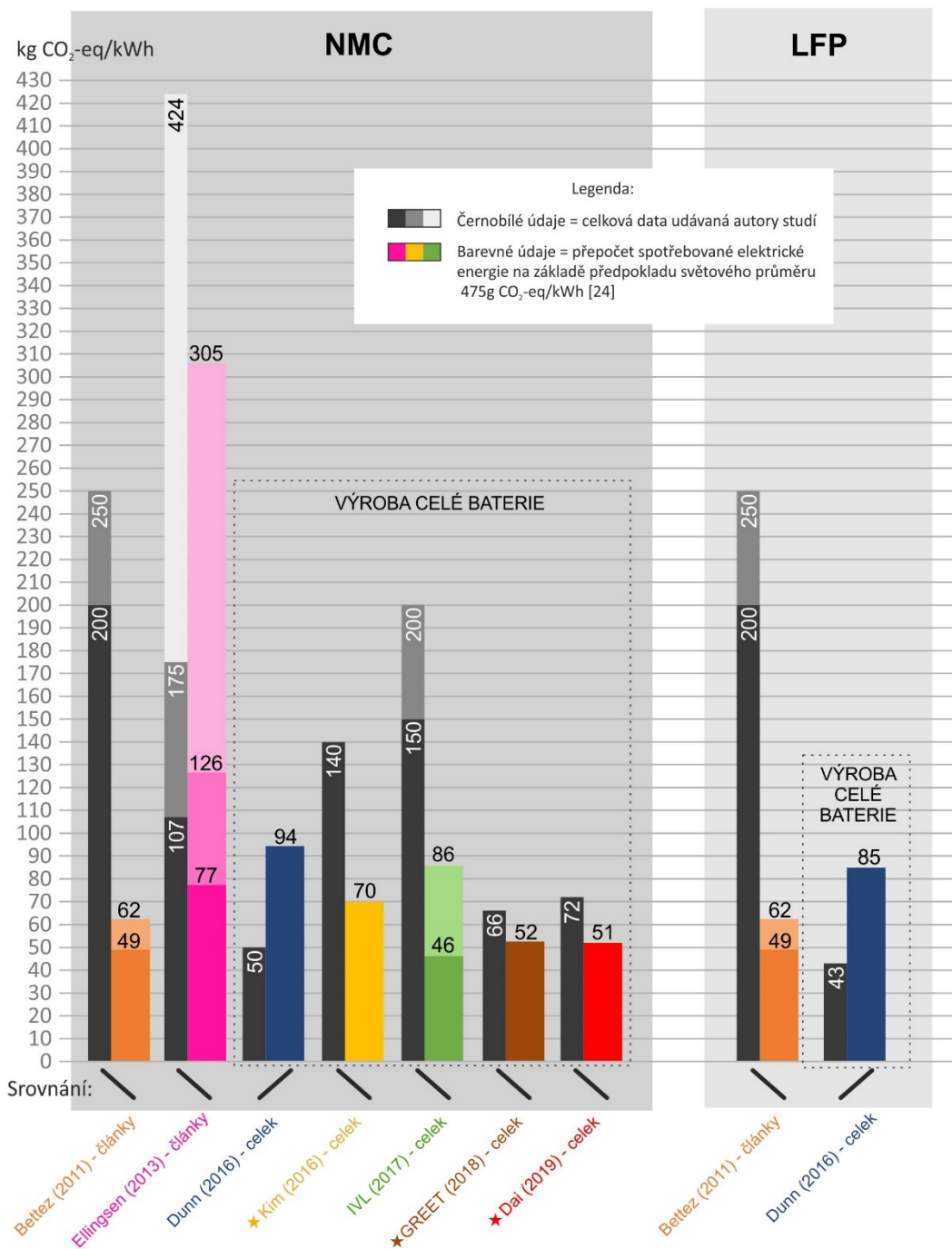
Výsledky jsou uvedeny barevně v následujícím grafu (Obr. 9). Černobíle, nalevo od každého barevného sloupce, je uveden výsledek autorů studií. Pod sloupci, které prezentují jednotlivé hodnoty, je graficky znázorněno srovnání, zda je vyšší hodnota autorů, či hodnota ze zmíněného přepočtu.

Protože autoři studií počítali vznik emisí z produkce primární energie a nikoliv pouze ze spotřebované elektřiny, jejich hodnoty jsou až na jednu výjimku vždy vyšší. Je to z toho důvodu, že kromě elektrické energie počítali také s výrobou především tepla, které je v reálném výrobním procesu přenášeno prostřednictvím páry. Proč je porovnání studie Dunn (2016) [4] opačné, není možné zjistit, protože se jedná o velmi krátký článek, ve kterém nejsou uváděny k této problematice podrobnosti. Takových hodnot, jakých dosáhli autoři této studie by bylo možné dosáhnout pouze v podmínkách s velmi nízkou hodnotou produkce CO₂ vztažené na jednu kilowatthodinu. Tedy v ekologickém energetickém mixu, který je pod světovým průměrem.

Výše využitý světový průměr produkce CO₂ vztažený na jednu kilowatthodinu je však nižší, než v zemích (Čína, Jižní Korea), kde se značné množství baterií skutečně vyrábí. Pro srovnání – v případě Číny je průměr produkce CO₂ vztažený na jednu kilowatthodinu pro rok 2018 roven 555 g CO₂ / kWh [24]. Pro Jižní Koreu byl tento údaj v roce 2018 roven 500 g CO₂ / kWh [25].



VYPRODUKOVANÉ EMISE CO₂ CELKOVÉ VÝSLEDNÉ EMISE UVÁDĚNÉ AUTORY PŘEPOČET ZE SPOTŘEBOVANÉ ELEKTRICKÉ ENERGIE



Obr. 9 – Vyprodukované emise CO₂



5 Vyhodnocení

První část závěru se věnuje stručnému zhodnocení každé studie. Druhá část se věnuje konkrétním výsledkům, které byly v rámci této práce vyčísleny.

5.1 Celkové zhodnocení

Cílem této kapitoly je stručné shrnutí jednotlivých studií. Použitím označení „kompletní proces“ se rozumí proces, který má počátek v těžbě surovin v ložiscích a konec v momentě, kdy výrobní závody opouštějí kompletně dokončené baterie, připravené na montáž do vozů.

5.1.1 GREET 2 Series (Vehicle-Cycle Model) – 2018

Pouze nástroj s řadou volitelných parametrů. Podrobné analýzy každého výrobního kroku. Velký rozsah nástroje. Nástroj je volně dostupný na webu vývojářů a je stále aktualizovaný. Chápání procesu montáže, který je vyčíslován zvlášť, je zavádějící (více v kapitole 2.4.6). Výsledky získané na základě tohoto nástroje pro srovnatelné vstupní parametry zpracovala studie Dai (2019). Data z obou zdrojů se skutečně shodují. Podrobnosti o této studii jsou uvedeny v kapitole 2.4.

5.1.2 Qiang Dai a kolektiv (2019)

V této studii je zpracován kompletní proces výroby baterií. Jsou zde uvedeny srovnání s výběrem ostatních studií. Každá surovina byla podrobena detailnímu vyčíslení produkce CO₂. Údaje o energetické náročnosti jsou získané z reálné výroby v roce 2018. Výroba probíhala v továrně, zprovozněné v roce 2016 v Číně – jméno společnosti není konkrétně zmíněno. Autoři tyto energetické údaje dále počítají pro podmínky v USA. Celá studie je postavena na nástroji GREET (více v kapitole 2.4), který je velmi detailní, ale také velmi rozsáhlý. Chápání procesu montáže, který je vyčíslován zvlášť, je zavádějící (více v kapitole 2.4.6). Podrobnosti o této studii jsou uvedeny v kapitole 3.1.



5.1.3 Majeau-Bettez a kolektiv (2011)

Autoři zpracovali podrobně kompletní proces výroby baterií. Studie je pouze teoreticky postavená na kalkulacích a laboratorních výzkumech. Jsou použity chemické látky na výrobu elektrodového pojiva, které produkuje velké množství CO₂. Není konkrétně uveden energetický mix. Výsledky spotřebované energie jsou dostupné pouze pro výrobu článků. Studie je staršího data. Podrobnosti o této studii jsou uvedeny v kapitole 3.2.

5.1.4 Dunn a kolektiv (2015)

Zabývá se kompletním výrobním procesem pouze v rámci výroby elektrod. Studie je navázaná na celou řadu předchozích prací tohoto kolektivu. Je zde napojení na nástroj GREET. Chybí konkrétní specifikace, zda se jedná o vyčíslení primární energie či nikoliv. Studie popisuje kroky výroby, ale neuvádí konkrétní data pro veškeré kroky. Autoři nepočítali s elektrolýzou kobaltu. Parametry elektrod jsou počítány s předpokladem pro rok 2020. Podrobnosti o této studii jsou uvedeny v kapitole 3.3.

5.1.5 Dunn a kolektiv (2016)

Krátký článek, jež prezentuje pouze výsledky bez dalších podrobností. Je zde návaznost na předchozí práce kolektivu a na nástroj GREET. Chybí konkrétní specifikace, zda se jedná o vyčíslení primární energie či nikoliv. Podrobnosti o této studii jsou uvedeny v kapitole 3.4.

5.1.6 Ellingsen a kolektiv (2013)

Data studie jsou založena na reálné výrobě. Autoři pracují s kompletním výrobním procesem baterie. Výsledky spotřebované energie jsou dostupné pouze pro výrobu článků. Továrna, ze které pochází data, není specifikována. Výrobní kapacita továrny byla nízká a hospodaření s energií nebylo efektivní. Chybí nejvyšší naměřené hodnoty. Podrobnosti o této studii jsou uvedeny v kapitole 3.5.



5.1.7 Kim a kolektiv (2016)

Studie disponuje daty z reálné výroby. Je vyčíslena energetická náročnost výroby celé baterie. Továrna pravděpodobně po dobu měření nebyla zcela vytížená. Autoři nepočítají s těžbou materiálu a jeho zpracováním. Energetický mix není pro část výroby v USA konkrétně uveden. Podrobnosti o této studii jsou uvedeny v kapitole 3.6.

5.1.8 Joanneum research (2019)

Data, která jsou relevantní pro tuto práci, byla převzata z práce Ellingsen (2013). Práce je v němčině. Podrobnosti o této studii jsou uvedeny v kapitole 3.7.

5.1.9 IVL (2017)

Studie nepřináší žádné vlastní nové výsledky. Jedná se o objektivní analýzu již vzniklých studií s utvořením závěru. Podrobnosti o této studii jsou uvedeny v kapitole 3.8.

5.2 Zjištěné výsledky

Zjištěné skutečnosti na základě analýzy studií.

5.2.1 Celkové emise

Pro výpočet výsledných emisí byly stanoveny následující předpoklady:

- a) Pro studii Kim (2016) byly přepočítány výsledky produkce emisí pro kompletní výrobní proces, včetně těžby materiálu. Tento přepočet byl proveden na základě dat studie IVL (2017) [7, s. 29], následujícím způsobem (8):

Těžba a zpracování materiálu pro použití při výrobě:

$$60 - 70 \text{ kg } CO_2 - eq / kWh \rightarrow \text{průměr} = 65 \text{ kg } CO_2 - eq / kWh \quad (8)$$

Výroba a montáž baterie:

$$70 - 110 \text{ kg } CO_2 - eq / kWh \rightarrow \text{průměr} = 90 \text{ kg } CO_2 - eq / kWh$$



Toto vyčíslení bylo převedeno na procentuální vyjádření (9):

Těžba a zpracování materiálu pro použití při výrobě:

$$65 \text{ kg CO}_2 - \text{eq/ kWh} \rightarrow 42 \% \quad (9)$$

Výroba a montáž baterie:

$$90 \text{ kg CO}_2 - \text{eq/ kWh} \rightarrow 58 \%$$

Výsledné hodnoty studie Kim (2016) byly podle toho přepočteny, aby byly srovnatelné s ostatními studiemi (10):

Výroba a montáž baterie:

$$70 \text{ kg CO}_2 - \text{eq/ kWh} = 58 \% \quad (10)$$

Těžba a zpracování materiálu + výroba a montáž baterie:

$$100\% = 120 \text{ kg CO}_2 - \text{eq/ kWh}$$

- b) Data z nástroje GREET 2 Series (Vehicle-Cycle Model) – 2018 nebyly zařazeny, protože se překrývají s výsledky studie Dai (2019). Jedná se o navzájem závislé zdroje, které by při použití obou měnily průměr nežádoucím způsobem.
- c) Pro studie Bettez (2011) a Elingsen (2013) byly přepočítány výsledky spotřeby elektrické energie pro kompletní výrobní proces celé baterie – nikoliv pouze článků. Tento přepočet byl proveden na základě dat studie IVL (2017) [7, s. 16], vyčíslení pro výrobu článků je následující (11):

$$\begin{aligned} \text{Výroba celé katody} &= 32,9 \% \text{ spotřebované energie} \\ \text{Výroba celé anody} &= 8,6 \% \text{ spotřebované energie} \\ \text{Výroba elektrolytu} &= 12,6 \% \text{ spotřebované energie} \\ \text{Výroba obalu článku} &= 8,1 \% \text{ spotřebované energie} \end{aligned} \quad (11)$$

Součet tohoto vyčíslení činí (12):

$$32,9 + 8,6 + 12,6 + 8,1 = 62,2 \approx 62 \% \quad (12)$$

Výroba článků = 62 % spotřebované energie



Na základě toho byly přepočteny (13) spotřeby energie studie Bettez (2011) a Ellingsen (2013) na porovnatelné hodnoty. Pro studii Ellingsen bylo pracováno pouze s dolní mezní hodnotou (LBV), kterou samotný autorská kolektiv studie bere jako směrodatnou:

$$\begin{aligned} \text{Bettez (2011)} &= 371 - 473 \text{ MJ/kWh} \rightarrow \text{průměr} = 422 \text{ MJ/kWh} \approx 62 \% \\ \text{Bettez (2011)} &= 680 \text{ MJ/kWh} \approx 100 \% \\ \text{Ellingsen (2013)} &= 586 \text{ MJ/kWh} \approx 62 \% \\ \text{Ellingsen (2013)} &= 945 \text{ MJ/kWh} \approx 100 \% \end{aligned} \tag{13}$$

Takto získaná data o celkové spotřebě elektrické energie, byla přepočítána na emise CO₂ na základě dat International Energy Agency [23], která uvádí hodnotu 475 g CO₂ / kWh.

Takto připravená data reprezentují výsledné emise pouze z produkce spotřebované elektrické energie pro světový průměr 475 g CO₂ / kWh [23], jelikož se však baterie vyrábějí především v Číně, byly vyčísleny také výsledné emise z produkce spotřebované elektrické energie pro čínský průměr 555 g CO₂ / kWh [24]. Dále byl stanoven průměr zkoumaných studií z takto získaných hodnot, který činí (14):

Světový průměr ze spotřebované elektřiny:

$$89 \text{ kg CO}_2 - \text{eq/ kWh}$$

Čínský průměr ze spotřebované elektřiny:

$$104 \text{ kg CO}_2 - \text{eq/ kWh} \tag{14}$$

Průměr ze spotřebované elektřiny:

$$\frac{89 + 104}{2} = 96,5 \text{ kg CO}_2 - \text{eq/ kWh}$$

Dále byl stanoven průměr emisní náročnosti celkového výrobního procesu, který uvádí autoři studií (15):

Průměr celkových emisí udávaných autory:

$$147 \text{ kg CO}_2 - \text{eq/ kWh} = 100\% \tag{15}$$



Z tohoto celku pak průměry ze spotřebované elektřiny tvoří následující podíl (16):

Podíl světového průměru ze spotřebované elektřiny:

$$89 \text{ kg CO}_2 - \text{eq/ kWh} \approx 61 \%$$

Podíl čínského průměru ze spotřebované elektřiny:

$$104 \text{ kg CO}_2 - \text{eq/ kWh} \approx 71 \% \quad (16)$$

Průměr obou podílů:

$$\frac{61 + 71}{2} = 66\%$$

Kombinací výsledků (14) a (16) dostaneme průměrný podíl emisí z výroby elektřiny na celkové produkci emisí (17):

$$96,5 \text{ kg CO}_2 - \text{eq/ kWh} = 66\% \quad (17)$$

Převedením na celkovou hodnotu pak dostáváme konečnou hodnotu (18):

$$146 \text{ kg CO}_2 - \text{eq/ kWh} = 100\% \quad (18)$$

Hodnota 146 kg CO₂-eq/kWh představuje průměrnou produkci emisí CO₂ pro kompletní proces výroby baterií – to znamená od vytěžení materiálu po hotovou kompletní baterii, která opouští výrobní závod. Tento výsledek je stanoven na základě respektování výsledků všech analyzovaných studií.

5.2.2 Celkové emise dle IVL (2017)

Vzhledem k povaze studie IVL, jejíž výsledky představují shrnutí všech studií, které tento kolektiv zkoumal – tedy nikoliv pouze jeden zdroj. Byly vypočteny výsledné průměrné emise také pouze na základě studie IVL.

Opět byly výsledky spotřebované elektrické energie ve studii IVL (2017) přepočítány (19) na produkci emisí podle světového (475 g CO₂/ kWh [23]) a čínského (555 g CO₂/ kWh [24]) průměru.

Produkce emisí ze spotřebované elektřiny dle světového průměru: (19)



46,1 – 85,7 kg CO₂ – eq/ kWh → průměr ≈ 66 kg CO₂ – eq/ kWh

Produkce emisí ze spotřebované elektřiny dle čínského průměru:

53,95 – 100,2 kg CO₂ – eq/ kWh → průměr ≈ 77 kg CO₂ – eq/ kWh

Autoři udávají následující vyprodukované emise z celkové výroby baterií:

Celkové vyprodukované emise udávané autory IVL (2017):

$$150 – 200 \text{ kg CO}_2 – \text{eq/ kWh} \quad (20)$$

Vztahy (19) jsou vyčísleny podílem z hodnot (20) v následujícím přepočtu (21):

$$\begin{aligned} 66 \text{ kg CO}_2 – \text{eq/ kWh} &= 44 \% \text{ z } 150 \text{ g CO}_2 – \text{eq/ kWh} \\ 77 \text{ kg CO}_2 – \text{eq/ kWh} &= 38,5 \% \text{ z } 200 \text{ g CO}_2 – \text{eq/ kWh} \end{aligned} \quad (21)$$

Průměr těchto podílů je (22):

$$\frac{44 + 38,5}{2} = 41,25 \% \quad (22)$$

Dle porovnávání výsledků studie IVL (2017) je tedy patrné, že emise vypočtené z výroby elektrické energie v rámci této práce tvoří průměrně pouze 41,25 %, celkových emisí. Na základě tohoto předpokladu pak přepočítáme vyjádření (14) pro tento podíl (22) – jak je uvedeno (23):

$$96,5 \text{ kg CO}_2 – \text{eq/ kWh} = 41,25\% \quad (23)$$

Převedením na celkovou hodnotu pak dostáváme výsledek (24):

$$234 \text{ kg CO}_2 – \text{eq/ kWh} = 100\% \quad (24)$$

Hodnota 234 kg CO₂-eq/kWh představuje průměrnou produkci emisí CO₂ pro kompletní proces výroby baterií – to znamená od vytěžení materiálu po hotovou kompletní baterii, která opouští výrobní závod. Tento výsledek je stanoven pouze na základě výsledků studie IVL (2017).



6 Závěr

Cílem práce bylo stanovit emise CO₂, které vznikají při výrobě baterií pro elektricky poháněná vozidla. Na základě analýzy a vyhodnocení všech zkoumaných studií bylo stanoveno, že průměrné emise činí 146 kg CO₂-eq/kWh.

Vzhledem k tomu, že výsledky studie IVL (2017) reprezentují celou řadu publikovaných studií, které tento kolektiv analyzoval, byly stanoveny výsledné emise z výroby baterií také pouze na základě dat IVL (2017) – takto stanovené průměrné emise činí 234 kg CO₂-eq/kWh.

Pro tyto závěry je naprosto zásadní použitý energetický mix lokality, kde výroba baterií probíhá. Energetický mix je zde reprezentován průměrnou produkcí CO₂ vztaženou na jednu kilowatthodinu elektrické energie. Pro potřeby této práce byl uvažován průměr čínského a světového energetického mixu.

Trend produkce emisí ve vyjádření kg CO₂-eq/kWh je klesající. Dle dostupných zdrojů je to důsledek zvyšování produkce baterií, které je spojeno s vyšším využíváním výrobních kapacit.

Podle analýzy současné výroby elektromobilů je zde pak trend výrazného zvětšování baterií jednotlivých vozidel. To znamená především růst váhy a kapacity baterií. Tento jev pak snižuje význam poklesu produkce emisí CO₂ v přepočtu na kilowatthodinu kapacity baterie.



7 Použitá literatura

- [1] DAI, Qiang, Jarod C. KELLY, Linda GAINES a Michael WANG. Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. *Sustainable Lithium Ion Batteries: From Production to Recycling* [online]. , 15 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2313-0105/5/2/48/pdf>
- [2] MAJEAU-BETTEZ, Guillaume. *Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es103607c>
- [3] DUNN, Jennifer, James CHRISTINE, Linda GAINES, Kevin GALLAGHER a Qiang DAI. *Material and Energy Flows in the Production of Cathode and Anode Materials for Lithium Ion Batteries* [online]. 2015 [cit. 2020-01-17]. Dostupné z: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2014/11/108520.pdf>
- [4] DUNN, Jennifer, Linda GAINES, Jarod KELLY a Kevin GALLANGER. *Life Cycle Analysis Summary for Automotive Lithiumion Battery Production and Recycling* [online]. 2016 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9781119275039.ch11>
- [5] KIM, Hyung Chul. *Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis* [online]. 2016 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.6b00830>
- [6] JUNGMEIER, G. *Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von Pkw-basierten Verkehrssystemen: Version 1.1* [online]. Joanneum research life, 2019 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <https://www.adac.de/-/media/pdf/tet/lca-tool---joanneum-research.pdf?la=de-de&hash=F06DD4E9DF0845BC95BA22BCA76C4206>
- [7] ROMARE, Mia a Lisbeth DAHLLÖF. *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries: A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles* [online]. In: . Stockholm, Sweden: IVL Swedish Environmental Research Institute, 2017, s. 48 [cit. 2020-06-05]. ISBN 978-91-88319-60-9. Dostupné z: <https://www.ivl.se/download/18.5922281715bdaebede9559/1496046218976/C243%20The%20life%20cycle%20energy%20consumption%20and%20CO2%20emissions%20from%20Lithium%20ion%20batteries%20.pdf>
- [8] *Global EV Outlook 2019* [online]. Paris: IEA, 2019 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>



- [9] *GREET 2 Series (Vehicle-Cycle-Model)*. Argonne, 2018 [cit. 1. 6. 2020]. Dostupné z: <https://greet.es.anl.gov/index.php>
- [10] DUNN, J.B., M. BARNES, J. SULLIVAN a M. WANG. *Material and Energy Flows in the Materials Production, Assembly, and End of Life Stages of the Automotive Lithium Ion Battery Life Cycle* [online]. 2012 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/biblio/1044525-material-energy-flows-materials-production-assembly-end-life-stages-automotive-lithium-ion-battery-life-cycle>
- [11] *Cambridge Dictionary* [online]. Cambridge University Press, 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/assembly?q=Assembly>
- [12] ELLINGSEN, Linda Ager-Wick. *Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jiec.12072>
- [13] AXSEN, J., A. BURKE a K. KURANI. *Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs): Goals and the State of Technology circa 2008* [online]. 2008 [cit. 2020-01-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/46440030_Batteries_for_Plug-in_Hybrid_Electric_Vehicles_PHEVs_Goals_and_the_State_of_Technology_circa_2008
- [14] RYDH, Carl a Björn SANDÉN. *Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part I: Performance and energy requirements* [online]. 2005. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890404002407>
- [15] NOTTER, D. A. *Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles* [online]. 2010. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es903729a>
- [16] *Electricity Data Browser* [online]. U.S. Energy Information Administration [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.eia.gov/electricity/data/browser/#/topic/0?agg=2,0,1&fuel=vvg&geo=g&sec=g&linechart=ELEC.GEN.ALL-US-99.M~ELEC.GEN.COW-US-99.M~ELEC.GEN.NG-US-99.M~ELEC.GEN.NUC-US-99.M~ELEC.GEN.HYC-US-99.M&columnchart=ELEC.GEN.ALL-US-99.M~ELEC.GEN.COW-US-99.M~ELEC.GEN.NG-US-99.M~ELEC.GEN.NUC-US-99.M~ELEC.GEN.HYC-US-99.M&map=ELEC.GEN.ALL-US-99.M&freq=M&start=201401&end=201412&ctype=linechart<ype=pin&columnvalues=1&rtype=s&maptype=0&rse=0&pin=>
- [17] *Application of Life-Cycle Assessment to Nanoscale Technology: Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles* [online]. U.S. EPA, 2013 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-01/documents/lithium_batteries_lca.pdf
- [18] *Batteryuniversity BMW i3* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/electric_vehicle_ev



- [19] BMW i3: Batteriegewicht. *Wikipedia* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://de.wikipedia.org/wiki/BMW_i3
- [20] Erdgas-Pkw mit bester Treibhausgas-Bilanz. *Adac Presse* [online]. 2019 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://presse.adac.de/meldungen/adac-ev/verkehr/erdgas-pkw-mit-bester-treibhausgas-bilanz.html>
- [21] DAI, Q. *Update of Life Cycle Analysis of Lithium-ion Batteries in the GREET Model*. Argonne National Laboratory. Lemont, USA: Argonne National Laboratory, 2017.
- [22] AHMED, A. Energy impact of cathode drying and solvent recovery during lithium-ion battery manufacturing. *Journal of Power Sources: Volume 322* [online]. 2016, , 169-178.
- [23] *International Energy Agency: Emissions Overview* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019/emissions>
- [24] *Climate Transparency 2019: Brown to green: China* [online]. 2019 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2019/11/B2G_2019_China.pdf
- [25] *Climate Transparency 2019: Brown to green: South Korea* [online]. 2019 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2019/11/B2G_2019_South_Korea.pdf



8 Seznam obrázků

Obr. 1 - Grafické srovnání studií ze zprávy Global EV Outlook 2019 [8, s. 152]	16
Obr. 2 - Specifikace montáže baterie (v originálu „Battery assembly“) převzata a přeložena ze zdrojové studie [10, s. 33] nástroje GREET 2 Series (Vehicle-Cycle-Model) 2018.....	21
Obr. 3 – Grafické zpracování využití energie ze studie Dai (2019) [1] - přeloženo.....	25
Obr. 4 – Srovnání dat GREET a Ecoinvet ze studie Dai (2019) [1] - přeloženo.....	28
Obr. 5 – Graf emisní náročnosti vozidel během jejich životního cyklu [20] - přeloženo	47
Obr. 6 – Spotřebovaná elektrická energie při výrobě Li-ion baterií	52
Obr. 7 – Porovnání měrné hustoty baterií ve studiích	54
Obr. 8 – Spotřeba elektrické energie (horní polovina grafu) v porovnání s hmotností baterií (dolní polovina grafu)	57
Obr. 9 – Vyprodukované emise CO ₂	59



9 Seznam příloh

Příloha 1: Kompaktní disk formátu CD s digitální podobou této práce ve formátu PDF.

Příloha 2: Tab. 21.: Přehled vybraných vyráběných elektromobilů k datu 6/2020.

10 Přílohy

Tab. 21.: Přehled vybraných vyráběných elektromobilů k datu 6/2020

	Název vozu:	rok:	váha celková:	váha baterie:	kapacita baterie:	měrná hustota:	technologie:	výrobce:
1.	Renault Twingo ZE	2020	1112	165	22	0,133	NCM712	LG Chem
2.	Smart EQ fortwo	2019	1085	178	17,6	0,099		Deutsche Accumotive
3.	Mini Cooper SE	2020	1365	200	32,6	0,163		CATL
4.	VW e-up	2020	1229	248	36,8	0,148	NCM622	LG Chem
5.	BMW i3	2019	1290	278	42,2	0,152	NCM622	Samsung SDI
6.	Nissan Leaf S	2018	1557	303	40	0,132	NCM523	Envision AESC
7.	Kia e-Niro	2019	1667	315	39,2	0,124		SK Innovation
8.	Renault ZOE ZE 50	2020	1577	326	54,66	0,168	NCM712	LG Chem
9.	VW e-Golf	2017	1615	349	35,8	0,103	NCM111	Samsung SDI
10.	Peugeot e-208	2019	1500	356	50	0,140	NCM523	CATL
11.	Hyundai IONIQ Electric	2020	1527	363	40,4	0,111	NCM622	LG Chem
12.	Nissan Leaf S Plus	2019	1715	410	62	0,151	NCM524	Envision AESC
13.	Kia e-Niro 4	2020	1812	457	67,5	0,148	NCM622	SK Innovation
14.	Kia e-Soul	2020	1682	457	67,5	0,148	NCM622	SK Innovation
15.	Tesla Model 3 (long range)	2017	1753	478	80,5	0,168	NCA	Panasonic
16.	Porsche Taycan 4S	2020	2140	554	79,2	0,143		LG Chem
17.	Audi e-tron 50 quattro	2020	2565	580	71	0,122		LG Chem
18.	Jaguar I-PACE	2019	2140	603	90	0,149	NCM622	LG Chem
19.	Porsche Taycan Turbo S	2020	2295	630	93,4	0,148	NCM622	LG Chem
20.	Tesla Model S (long range)	2016	2241	630	102,4	0,163	NCA	Panasonic
21.	Tesla Model X (long range)	2016	2554	630	102,4	0,163	NCA	Panasonic
22.	Mercedes-Benz EQC 400 4Matic	2020	2495	652	85	0,130	NCM622	LG/SK
23.	Audi e-tron 55 quattro	2019	2490	700	95	0,136	NCM622	LG Chem
			[kg]	[kg]	[kWh]	[kWh/kg]		