

# Analýza současného stavu v oblasti lithiových baterií (SS02030008-V13)

Verze 1, 31.10.2022

Konečný uživatel výsledků: **Ministerstvo životního prostředí**

Vršovická 1442/65

Praha 10, 100 10

**Název projektu:** Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost CEVOOH

**Číslo projektu:** CEVOOH SS02030008

**Řešitel projektu:** Česká informační agentura životního prostředí (CENIA)  
Moskevská 1523/63, Praha 10, 101 00

**Vypracoval:** Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta strojního inženýrství,  
Ústav procesního inženýrství  
Technická 2896/2, 616 69 Brno

**Doba řešení:** 2021 až 2026

**Cíl projektu:** Cílem projektu je vybudování dlouhodobě pracující, odborné, interdisciplinární, výzkumné základny tvořené klíčovými výzkumnými organizacemi disponujícími expertízou a odbornou kapacitou pro provádění výzkumu v oblasti odpadového a oběhového hospodářství v širších souvislostech. Centrum bude poskytovat Ministerstvu životního prostředí, dalším resortům, odborným platformám a dalším subjektům výsledky výzkumu, rozšiřování vědeckých poznatků a expertní podporu při tvorbě politik, strategií a regulací. Centrum tvořené konsorciem osmi výzkumných organizací a univerzit je zaměřeno na provádění výzkumu

v tematických oblastech souvisejících s přechodem České republiky z lineárního na cirkulární hospodářský model. Tento přechod vyžaduje výzkum v nových, dosud neřešených oblastech, jakými jsou například materiálové toky surovin, inovativní technologie zaměřené na minimalizaci použití primárních surovin ve výrobě, maximální materiálovou využitelnost a využívání odpadů, vedlejších produktů a meziproductů, ekodesign produktů, sledování a vyhodnocování nejen environmentálních, ale také sociálně-ekonomických procesů. Hlavními tematickými oblastmi, na které se Centrum v rámci své činnosti zaměří, jsou odpadové a oběhové hospodářství, monitoring a rozvoj nových monitorovacích nástrojů sledování přechodu k oběhovému hospodářství, včetně vývoje nových indikátorů, analýza životní cyklu výrobků, ekodesign, problematika kontaminace prostředí z hlediska technologií, nově se vyskytujících polutantů, využití nových metod a přístupů k identifikaci a odstranění znečištění, např. prostřednictvím dálkového průzkumu země. Neopominutelným tématem je také oblast environmentální bezpečnosti, prevence závažných havárií a tím související témata kybernetické bezpečnosti a společenské přijatelnosti environmentálně a technologicky podmíněných. Činnost Centra propojuje přírodovědné, technické a humanitní obory v jedné interdisciplinární platformě s cílem posunout ČR blíže k oběhovému hospodářství.

## Informace o autorském týmu:

Hlavní řešitel projektu: **Mgr. Miroslav Havránek**

Garant výsledku: **Ing. Michal Šyc, Ph.D.**

Autorský kolektiv:

- UCHP: **Ing. Petra Kameníková, Ph.D.; Ing. Michal Šyc, Ph.D.**

Ústav chemických procesů AV ČR, v.v.i.

Rozvojová 135, Praha 6 – Suchbátka

Česká Republika, 165 00

<https://www.icpf.cas.cz/>



INSTITUTE  
OF CHEMICAL  
PROCESS  
FUNDAMENTALS  
OF THE ASCR

Garant MŽP: **Ing. Vlastimil Kotrč**

## Další informace o výstupu:

*Výstup byl vytvořen v rámci řešení projektu CEVOOH – Centrum environmentálního výzkumu: Odpadové a oběhové hospodářství a environmentální bezpečnost, jehož řešitelem byla Česká informační agentura životního prostředí (CENIA).*



Projekt je podpořen Technologickou agenturou České republiky (TA ČR) v rámci 2. veřejné soutěže Programu na podporu aplikovaného výzkumu, experimentálního vývoje a inovací v oblasti životního prostředí – Prostředí pro život. STA02019SS020

## Obsah

1. Složení lithium-iontových akumulátorů .....	5
Katoda .....	5
Anoda.....	5
Elektrolytický systém a separátor.....	6
2. Rozdělení LIB podle použitého katodového materiálu, jejich vlastnosti, použití a podíl na trhu.....	7
3. Vývoj produkce LIB.....	12
4. Recyklace LIB .....	16
Metody recyklace.....	18
Průmyslové procesy pro recyklaci LIB.....	22
5. Reference .....	28

# Lithium-iontové akumulátory – složení a možnosti recyklace

---

## 1. Složení lithium-iontových akumulátorů

Lithium-iontový akumulátor (též Li-ion baterie, LIB) se skládá z katody, anody a elektrolytického separátoru. Elektrody jsou tvořeny aktivním materiálem smíchaným s nosičem (binder), tato směs je nanášena na fólii z vodivého materiálu. Nosič se obvykle používá stejný na katodě i anodě, ačkoli aktivní materiál je pochopitelně jiný; nejčastěji používaným nosičem je polyvinyliden difluorid (PVDF). Separátor je tvořen porézní membránou smočenou v elektrolytickém roztoku. Článek je uzavřen pláštěm, který může být vyroben z oceli (především u cylindrických článků) nebo hliníku (u hranolových (prismatických) článků). U některých levných hranolových článků se používá plášť plastový. [1] [2] [3]

### Katoda

Katoda tvoří 25—30 % celkové hmotnosti baterie. Je tvořena hliníkovou fólií, na níž je nanášen katodový materiál, který se skládá z cca 80—85 % aktivního materiálu, 10 % nosiče (PVDF) a 5 % uhlíku (carbon black). Mezi nejčastěji používané aktivní materiály katody patří  $\text{LiCoO}_2$  (označovaný jako LCO),  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  (LMO),  $\text{LiNiO}_2$  (LNO),  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$  (NMC),  $\text{LiNiCoAlO}_2$  (NCA) a  $\text{LiFePO}_4$  (LFP). Aktivní materiál katody je určující pro vlastnosti a využití baterie a také je její nejcennější složkou, vzhledem k obsahu cenných materiálů. Katodovým materiálům tedy bude věnována samostatná kapitola.

### Anoda

Anoda představuje 15—30 % celkové hmotnosti baterie. Je tvořena měděnou fólií s nanášenou vrstvou anodového materiálu, kterým je nejčastěji uhlíkatý materiál (přírodní či umělý grafit, amorfní uhlík). Alternativním materiálem je  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  (LTO), jehož výhodou oproti grafitu je strukturní stabilita, nevýhodou ovšem nižší energetická hustota a vyšší cena. Proto nachází uplatnění zejména v aplikacích s vysokými nároky na bezpečnost, především v medicíně. Dále

se v posledních letech věnuje velká pozornost sloučeninám křemíku (nař.  $\text{LiFeSiO}_4$ ), které mají podstatně vyšší kapacitu než grafit (přibližně 10x), ale jejich použití je limitováno značnými změnami objemu při nabíjení a vybíjení, které vedou k rychlému znehodnocení baterie. V současné době se tyto sloučeniny používají ve směsi s grafitem, tak aby bylo dosaženo zvýšení kapacity, ale zároveň aby nedocházelo k tak velkým změnám objemu, které by vedly k narušení struktury materiálu [4].

## Elektrolytický systém a separátor

Separátor je nejčastěji tvořen mikroporézním polyethylenem nebo polypropylenem, který umožňuje průchod iontů lithia. Separátor je smočen v roztoku elektrolytu a rozpouštědla. Jako elektrolyt se používají soli lithia vysoké čistoty, např.  $\text{LiClO}_4$ ,  $\text{LiPF}_6$ ,  $\text{LiBF}_4$ ,  $\text{LiAsF}_6$ ,  $\text{Li}(\text{CF}_3\text{SO}_3)$ ,  $\text{Li}[\text{N}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2]$ , rozpouštědlem je nejčastěji ethylenkarbonát (EC), dimethylkarbonát (DMC), propylenkarbonát (PC).

Elektrolyt se na celkové hmotnosti baterie podílí asi 10–15 %, separátor obvykle méně než 5 %.

Přehled jednotlivých komponentů baterie a složení získané z hodnot popsanych v literatuře je uvedeno v *Tab. 1*.

*Tab. 1: Průměrné složení Li-ion baterií [2], [5].*

Složka baterie	Chemické složení	hm.%
Vnější plášť	Ocel (Fe, Ni)	20–26
	Al	10
Katoda		25–30
Hliník	Al Vodivá fólie	5–8
Nosič	Obvykle PVDF	1–2
Oxidy kovu	Li	1,5–7
	Co LCO ( $\text{LiCoO}_2$ )	5–20
	Ni LNO ( $\text{LiNiO}_2$ )	5–10

	NCA ( $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ )	
	Mn LMO ( $\text{LiMnO}_2$ )	5–11
	NMC ( $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$ )	
Polymerní separátor	Mikroporézní PP, PE nebo PP/PE	4–10
Elektrolyt		10–15
Soli lithia	$\text{LiPF}_6$ , $\text{LiAsF}_6$ , $\text{LiClO}_4$ , $\text{LiBF}_4$	
Organické rozpouštědlo	DMC-EC, PC-DME, BL- THF	
Anoda		15–25
Měď	Cu Vodivá fólie	8–10
Nosič	Obvykle PVDF	1–2
Grafit		13–23

## 2. Rozdělení LIB podle použitého katodového materiálu, jejich vlastnosti, použití a podíl na trhu

První lithiové baterie, které byly úspěšně uvedeny na trh v roce 1991, používaly jako aktivní materiál katody  $\text{LiCoO}_2$  (LCO). Jejich hlavními výhodami oproti do té doby používaným akumulátorům (dominantně typu Ni-Cd a Ni-MH) byla vysoká energetická hustota, vysoký počet nabíjecích cyklů, a hlavně netrpěly paměťovým efektem [6]. Další vývoj aktivních materiálů se zaměřil zejména na prodloužení životnosti akumulátoru, zvýšení okamžitého výkonu a bezpečnost při zvýšených teplotách. Neméně důležitým cílem je snaha o snížení obsahu kobaltu, kvůli jeho vysoké ceně a problematické dostupnosti. Přestože se takové

materiály podařilo vyvinout, udržují se baterie typu LCO stále na trhu, a to zejména pro spotřební elektroniku, jako jsou mobilní telefony, tablety a notebooky. [7]

Baterie na bázi  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  (LMO) mají oproti LCO nižší kapacitu, ale jejich výhodou je možnost použití větších proudů, a to jak při nabíjení (umožňují rychlonabíjení), tak při vybíjení (poskytují vyšší okamžitý výkon). Mají také vyšší teplotní stabilitu, jsou tedy bezpečnější. Mezi jejich nevýhody patří nižší počet nabíjecích cyklů a kratší životnost. Baterie využívající čistě LMO nejsou v současné době příliš rozšířené, nalezneme je například v aku-nářadí. Širší uplatnění aktivního materiálu LMO je ve směsi s  $\text{LiNiMnCoO}_2$  (NMC), kde NMC zvýší kapacitu baterie a prodlouží životnost, zatímco LMO umožní vyšší okamžitý výkon. Z toho důvodu jsou baterie LMO/NMC ve velké míře využívány pro elektromobily – umožňují kombinaci dlouhého dojezdu a akcelerace. [7]

$\text{LiFePO}_4$  (LFP) je dostupný a levný materiál, který má dobré elektrochemické vlastnosti a nízký vnitřní odpor, díky tomu snáší vyšší proudové zatížení. Mezi další přednosti patří dlouhá životnost, teplotní stabilita a bezpečnost. Hlavní nevýhodou je nízká kapacita, z toho důvodu se nevyužívá v bateriích pro spotřební elektroniku, ale nachází uplatnění pro úložiště energie, v průmyslu a speciálních aplikacích. Zvláštní kapitolou je velké rozšíření LFP baterií pro elektromobilitu v Číně, které je dáno specifickou situací na čínském trhu v důsledku dotací a velkým množstvím elektrických autobusů, lehkých užitkových vozidel a nákladních aut. Ve zbytku světa se uživatelé elektromobilů orientují na maximální dojezd na jedno nabití, takže dominují baterie NMC, případně NCA. Přestože se předpokládalo, že i v Číně se bude postupně podíl LFP baterií snižovat a budou je nahrazovat baterie typu NMC [8], podle nejnovější zprávy Mezinárodní agentury pro energii (IEA) ohledně vývoje na poli elektromobility jsou naopak za poslední rok LFP baterie pro elektromobily na vzestupu [9]. To je způsobeno nejen zvýšením produkce v Číně, ale překvapivě i „objevením“ LFP baterií západními automobilkami (Tesla, VW), které ohlásily plány na využití LFP ve svých modelech elektromobilů [10], [11].

Aktivní materiály kombinující nikl, mangan a kobalt, označované jako  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$  (NMC), jsou v současné době považovány za nejúspěšnější výsledek vývoje Li-ion baterií. Nikl dodává baterii vysokou kapacitu, ale má nízkou stabilitu. Tu naopak zvyšuje mangan, který tvoří strukturu aktivního materiálu. Původně se používaly materiály obsahující Ni, Mn a Co ve stejném hmotnostním poměru (označované 111 nebo 333), nyní se můžeme setkat s různými kombinacemi, které jsou především motivovány snahou snížit obsah kobaltu z důvodu jeho vysoké ceny. Mezi časté kombinace patří např. 5 dílů niklu, 3 díly manganu a 2 díly kobaltu



(NMC532), dále NMC622, NMC811 a jiné. (Někteří výrobci používají jiné pořadí označení materiálů, např. NCM.) NMC baterie mají univerzální použití, využívají se pro elektrokola a elektromobily, v aku náradí, jako úložiště energie i v průmyslu. Jak již bylo zmíněno výše, častá je kombinace aktivního materiálu NMC s LMO.

Materiál  $\text{LiNiCoAlO}_2$  (NCA) má podobné vlastnosti jako NMC – vysokou kapacitu, dobrou životnost a okamžitý výkon. Stabilita materiálu je v tomto případě vylepšena přidávkou hliníku. Mají i podobné využití jako NMC, jsou využívány v elektromobilech značky Tesla.

V následujících tabulkách jsou shrnuty informace o složení a vlastnostech baterií podle použitého katodového materiálu. Přehled obsahu kovů a dalších složek v jednotlivých typech baterií je uveden v Tab. 2 [2]:

*Tab. 2: Obsah vybraných kovů v bateriích s různým typem aktivního katodového materiálu (vztaženo na celou baterii) [2].*

Typ baterie	$\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}$	$\text{LiMn}_2\text{O}_4$	$\text{LiNiMnCoO}_2$ (typu 523)	$\text{LiCoO}_2$	$\text{LiFePO}_4$
Kovy	Obsah (hm.%)	Obsah (hm.%)	Obsah (hm.%)	Obsah (hm.%)	Obsah (hm.%)
Hliník	21,9	21,7	22,7	5,2	6,5
Kobalt	2,3	-	8,4	17,3	-
Měď	13,3	13,5	16,6	7,3	8,2
Lithium	1,9	1,4	1,2	2,0	1,2
Mangan	-	10,7	5,9	-	-
Nikl	12,1	-	14,8	1,2	-

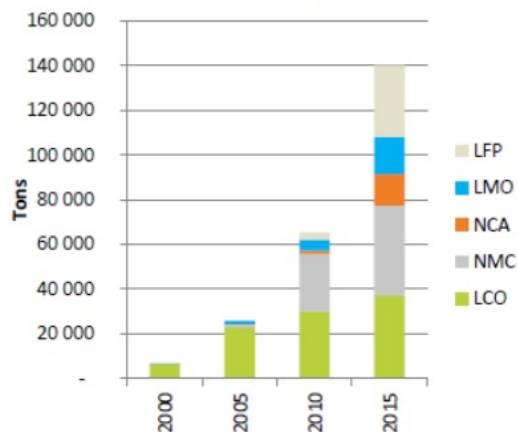
Tab. 3 poskytuje stručný přehled základních charakteristik a možností využití baterií podle typu:

Tab. 3: Vlastnosti a využití jednotlivých typů LIB [3], [5], [7], [12], [13].

Označení	Materiál katody	Výhody	Nevýhody	Použití
LCO	$\text{LiCoO}_2$	Vysoká objemová kapacita (>500 Wh/l), životnost >500 cyklů	Nebezpečí požáru, cena a dostupnost Co	Spotřební elektronika
LMO	$\text{LiMn}_2\text{O}_4$	Levné, bezpečné	Objemová kapacita do 300 Wh/l, životnost 300 cyklů, nevhodné pro vysoké teploty	Spotřební elektronika, aku náradí, EV (ve směsi s NMC)
LFP	$\text{LiFePO}_4$	Bezpečné, levné, životnost až 2000 cyklů, použitelné za vyšších teplot	Objemová kapacita 210 Wh/l	Aku náradí, RC modely, elektrokola, medicína, EV a E-bus v Číně, úložiště energie
NMC	$\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$	Vysoká objemová kapacita, bezpečnost	Vysoká cena Co a Ni, patentová ochrana	EV, aku náradí, úložiště energie
NCA	$\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$	Vysoká objemová kapacita	Nebezpečí požáru, cena Co a Ni	EV (Tesla), spotřební elektronika, aku náradí
LNO	$\text{LiNiO}_2$	Bezpečné, použití při nízkých teplotách, životnost až 1500 cyklů	Objemová kapacita do 300 Wh/l	EV, HEV, málo rozšířené

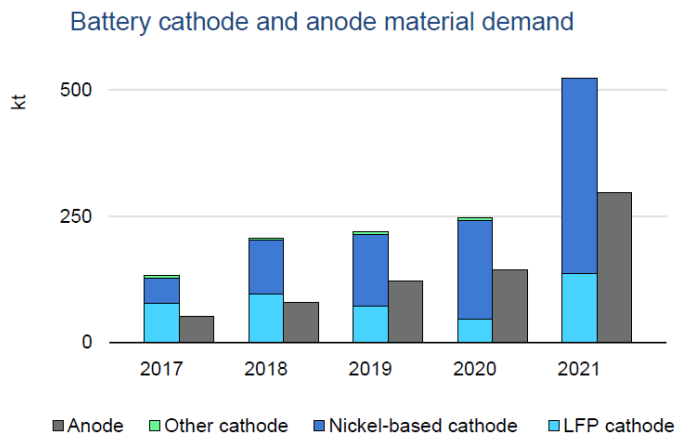
Na Obr. 1 je uveden graf vývoje poptávky po aktivních materiálech katody mezi lety 2000 a 2015 [14]. V roce 2015 tvořila celková poptávka 140 tis. tun a nejpoužívanějšími materiály byly LCO a NMC. V pravé části je uvedena tabulka s odhadem poptávky v roce 2025 podle stejného zdroje (z roku 2016), kde je vidět, že největší nárůst byl očekáván u NMC a dále u NCA, tedy materiálů používaných pro baterie k elektromobilům (za předpokladu, že NMC bude nadále dominantním typem pro elektromobily a Tesla zůstane u baterií NCA). Na Obr. 2 vidíme vývoj trhu s katodovými materiály pouze pro elektromobilitu od roku 2017 do 2021. V roce 2021 byla poptávka po katodových materiálech 210 tis. tun, z toho přibližně ¼ představoval materiál LFP, zbytek katody na bázi niklu, tedy NMC a NCA [9].

**Cathode active materials for LIB in Tons, 2000-2015 (Demand)**



	2015		2025		Očekávaný nárůst (%)
	%	kt	%	kt	
LCO	26	37	16	64	170
NMC	29	40	48	192	480
LFP	23	32	16	64	200
LMO	12	17	10	40	240
NCA	10	14	10	40	290
<b>Celkem</b>	<b>100</b>	<b>140</b>	<b>100</b>	<b>400</b>	<b>290</b>

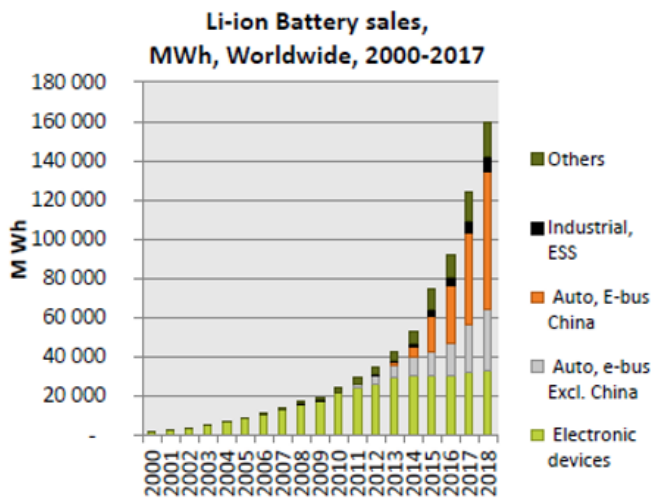
*Obr. 1: Vývoj globálního trhu s katodovými materiály v letech 2000—2015 (vlevo) a předpověď pro rok 2025 ve srovnání s rokem 2015 podle stejného zdroje (vpravo) [14].*



Obr. 2: Vývoj globálního trhu s katodovými materiály pro elektromobilitu v letech 2017–2021 [9].

### 3. Vývoj produkce LIB

Od uvedení na trh v 90. letech 20. století zaznamenávají Li-ion baterie setrvalý růst poptávky, nejprve díky rozmachu přenosné spotřební elektroniky (mobilní telefony, smartphony, notebooky, tablety, aj.), v posledních letech vlivem nástupu elektromobilů. Vývoj světového trhu s LIB v MWh vidíme na Obr. 3. V roce 2018 byla poptávka po LIB v objemu 160 tis. MWh, z toho bylo 44 % pro elektromobily a elektrobuses v Číně, 20 % mimo Čínu, 20 % pro spotřební elektroniku, 5 % pro průmyslové aplikace a úložiště energie [15]. Detailnější informace o počtu prodaných kusů různých zařízení a odpovídající hmotnosti baterií za rok 2016 poskytuje Tab. 4, podle Winslow et al. [2].



Obr. 3: Vývoj prodeje LIB v letech 2000—2018 podle aplikace [15].

Tab. 4: Zařízení využívající Li-ion baterie, celosvětová produkce v roce 2016 [2].

Zařízení	Odhadovaná živostnost	Obvyklá hmotnost zařízení	Obvyklý podíl LIB na hmotnosti zařízení	Přibližné množství prodaných kusů celosvětově (2016)	Průměrná hmotnost použitých LIB (2016)
	roky	kg	hm.%	počet	t
Mobilní telefon	4	0,11–0,22	13,3–15,0	885 000 000	21 000
Fotoaparát	6,5	0,4–0,8	15–20	20 000 000	2 000
Elektromobil	9	1200–2500	15–30	487 000	203 000

Zařízení	Odhadovaná živostnost	Obvyklá hmotnost zařízení	Obvyklý podíl LIB na hmotnosti zařízení	Přibližné množství prodaných kusů celosvětově (2016)	Průměrná hmotnost použitých LIB (2016)
	roky	kg	hm. %	počet	t
Plug-in Hybrid	9	1200–2000	5–15	286 000	46 000
Laptop	5,5	1,35–2,80	13,4–16,7	152 000 000	48 000
Smartphone	2,1	0,10–0,18	18–23	1 500 000 000	43 000
Tablet	5,1	0,4–0,7	7,7–15,0	182 000 000	11 000
<b>Celkem</b>					<b>374 000</b>

Předpovědi dalšího vývoje trhu s LIB (např. podle Global Battery Alliance, 2020 – Obr. 4 [19] [16]) předpokládají pro příští roky mírný nárůst baterií pro spotřební elektroniku, ale násobný růst množství baterií pro elektromobily. Kromě toho se předpokládá nárůst využívání LIB pro skladování energie, a to také v souvislosti tím, že vysloužilé baterie z elektromobilů, které v důsledku poklesu maximální kapacity již nesplňují nároky na dojezd, mohou ještě dále sloužit jako úložiště energie například z obnovitelných zdrojů nebo jako součást tzv. chytrých sítí (takové využití se označuje jako „second-life batteries“). Tímto způsobem je možné prodloužit životnost baterií o 5–10 let [17]. Na druhou stranu někteří výzkumníci upozorňují, že toto prodlužování životnosti baterií bude blokovat recyklaci prvků potřebných pro výrobu nových LIB, a k tomu účelu, kde není zásadní požadavek na vysokou energetickou hustotu, jako v případě elektromobilů [18] [19].

*Obr. 4: Předpověď možného vývoje trhu s bateriemi (všech typů) [16].*

Ačkoli v celosvětovém měřítku již převažují objemy prodaných LIB pro elektromobilitu nad LIB pro spotřební elektroniku (bráno na celkovou hmotnost, případně kapacitu baterií) přibližně od roku 2016, v podmínkách ČR sledujeme nástup elektromobilů až v posledních letech. Jak je vidět z Tab. 5, k výraznému nárůstu jejich počtu dochází až od roku 2020. Při předpokládané životnosti baterie elektromobilu kolem osmi až deseti let z toho vyplývá, že k výraznému nárůstu množství vysloužilých baterií určených k recyklaci začne u nás docházet po roce 2025 nebo spíše 2030.

*Tab. 5: Registrace nových osobních vozidel v ČR podle druhu paliva (baterie) [20].*

	BEV	PHEV	Celkem
2008	0	0	0
2009	7	0	7

---

2010	6	0	6
2011	56	0	56
2012	91	0	91
2013	45	0	45
2014	217	0	217
2015	325	0	325
2016	262	0	262
2017	387	0	387
2018	703	278	981
2019	756	470	1226
2020	3262	1978	5240
2021	2646	3735	6381

---

BEV -- Bateriová elektrická vozidla

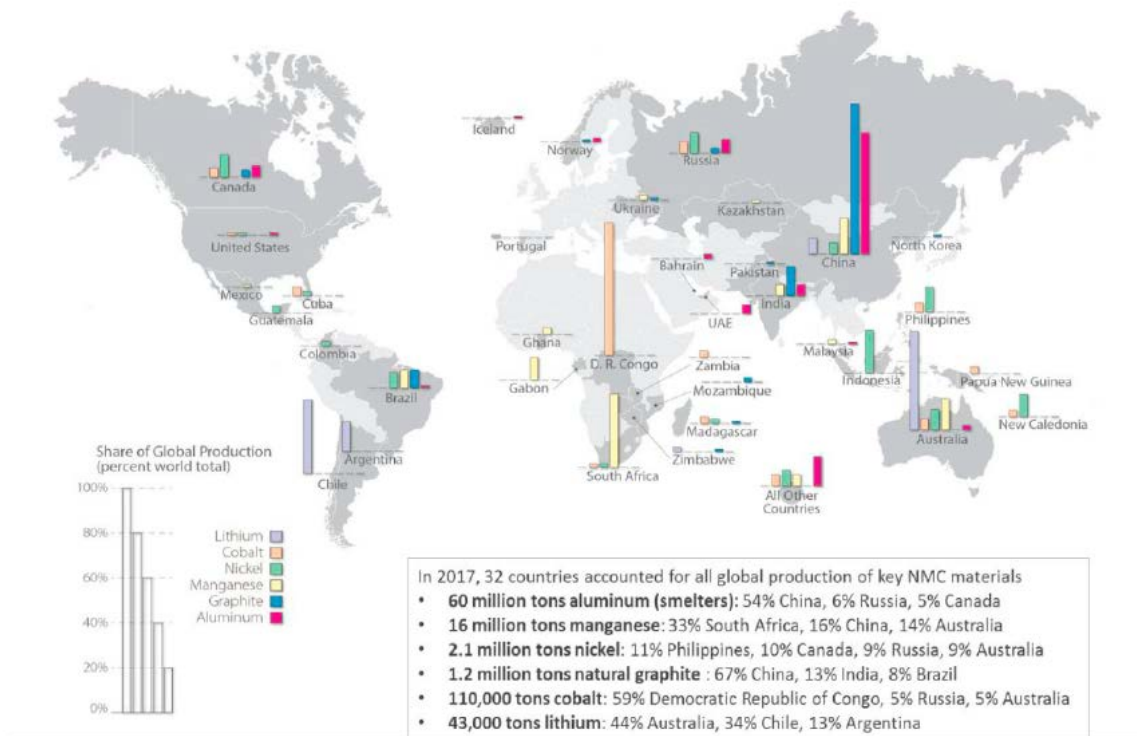
PHEV -- Plug-in hybrid

## 4. Recyklace LIB

Při aktuálním množství baterií uváděných na trh, zvláště v souvislosti s elektromobilitou je zřejmé, že v blízké budoucnosti budeme konfrontováni s nutností zpracování velkého množství odpadních baterií na konci životnosti. Jejich recyklace přispívá k ochraně životního prostředí, šetří cenné zdroje, snižuje množství odpadu a může být ekonomicky výhodná. V současné době stále část baterií končí na skládkách, což představuje jednak riziko pro životní prostředí, vzhledem k obsahu těžkých kovů a také ke značnému riziku vznícení a požáru. Úspora primárních surovin při recyklaci materiálů pro výrobu nových baterií může dosáhnout až 51 % (včetně úspory energie nutné pro těžbu surovin a jejich zpracování) [1].



Na následujícím Obr. 5 je uveden přehled surovin potřebných pro produkci Li-ion baterií podle země původu, společně s bilancí za rok 2017.



Obr. 5: Produkce surovin pro materiály používané v LIB [21].

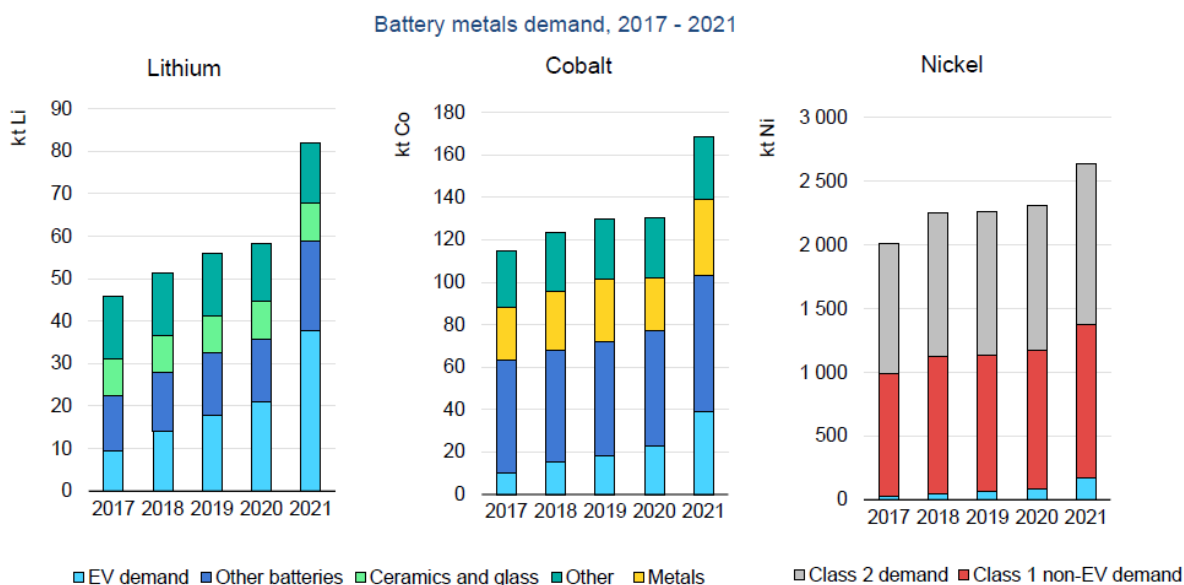
Kritickými materiály pro výrobu LIB jsou lithium, kobalt a nikl. Na Obr. 6 je uveden vývoj světové produkce těchto kovů mezi roky 2017 a 2021 a podíl baterií pro elektromobilitu a pro jiné účely na poptávce.

Produkce **lithia** se mezi roky 2017 a 2021 téměř zdvojnásobila na 70 kt v roce 2021, přičemž baterie pro elektromobily tvoří největší podíl na poptávce [9]. Zdroje lithia jsou v současnosti považovány za dostatečné, avšak není vyloučeno, že do roku 2050 může být velké množství rezerv vyčerpáno, vzhledem k tomu, že pro rozvoj elektromobility zatím neexistuje za lithium alternativa [1]. Největší světové zásoby mají Chile a Austrálie.

Produkce **kobaltu** v roce 2021 dosáhla 170 kt, kobalt je kromě baterií využíván ve slitinách a katalyzátorech. Největším světovým producentem kobaltu je Konžská demokratická republika (DRC). S těžbou kobaltu je spojována velká zátěž pro životní prostředí a také je zdokumentováno časté využívání dětské práce a středověké pracovní podmínky

s neexistujícími opatřeními pro bezpečnost práce v dolech na území DRC. Kromě toho je většina těchto dolů pod kontrolou čínských společností nebo lokálních ozbrojených skupin, které využívají výnosy z těžby pro financování dalších bojů. Vedle vysoké ceny kobaltu i tyto důvody přispívají k vývoji aktivních materiálů s nižším nebo žádným obsahem kobaltu. [22] [23]

**Nikl** je využíván dominantně pro výrobu oceli. Produkce niklu v roce 2021 činila 2640 kt, z čehož poptávka pro výrobu elektromobilů činila 7 % [9]. Pro baterie je použitelný jen nikl třídy 1 (čistota vyšší než 99,8 %), jehož největším světovým producentem je Rusko. V současné geopolitické situaci tak dochází k nepředvídatelnému vývoji ohledně dodávek a cen.



Obr. 6: Světová produkce lithia, kobaltu a niklu v letech 2017—2021 a podíl baterií na poptávce [9].

## Metody recyklace

Recyklační metody je obecně možné rozdělit na pyrometalurgické a hydrometalurgické, v některých případech se uplatňují i metody přímé mechanické recyklace.

Před vlastním procesem recyklace, ať pyro- či hydro-metalurgickým, je potřebná příprava a předúprava baterií. **Přípravou** se obvykle rozumí například rozmontování větších celků (jako jsou battery-packy z elektromobilů) a vybití baterií, díky čemuž se sníží riziko exploze a požárů při dalším zpracování. Vybití se nejčastěji provádí ponořením baterií do nasyceného roztoku

NaCl nebo  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Alternativně je možné baterie řízeně zkratovat nebo baterie „dovybít“ a získanou energii využít, což je spíše teoretická možnost, protože případný zisk energie nevyrovná investiční náklady.

**Předúprava** baterií má za cíl snížení objemu odpadních frakcí, např. plastových součástí, a zakonzentrování kovů. Před hydrometalurgickými procesy je předúprava nutná, aby se uvolnil aktivní materiál a také aby se odstranily složky, které mají rušivý vliv při loužení, např. Al a Cu.

Pro předúpravu mohou být použity metody termické, mechanické, fyzikální, chemické a mechano-chemické. Termické metody rozkládají organické složky, především nosič, který zajišťuje přilnutí aktivního materiálu na fólii katody. Mechanické a fyzikální metody mají za cíl uvolnit vnější plášť a rozdělit materiál na několik frakcí, přičemž je uvolněn aktivní materiál. Tyto metody spočívají v drčení nebo mletí materiálu s následnou separací magnetickou nebo pomocí vířivých proudů. Chemické metody využívají organická rozpouštědla nebo superkritické tekutiny k extrakci elektrolytu nebo rozpuštění nosiče.

Při **pyrometalurgickém procesu** se baterie zpracovávají ve vysokoteplotní peci, kde jsou přítomné kovy ve formě oxidů redukovány a vzniká slitina kobaltu, mědi, železa a niklu. Dalším produktem je struska, která obsahuje hliník, mangan a lithium. Organické složky baterie, jako je elektrolyt, polymerní nosič nebo elektrolytický separátor, se za zvýšené teploty rozkládají a odcházejí ve formě plynů. Plyny musí být dopalovány a čištěny, aby se zabránilo emisím nebezpečných látek, včetně VOC, dioxinů, HCl a HF.

K dalšímu využití je použita slitina cenných kovů Co, Cu, Fe a Ni, zatímco lithium ze strusky je možné recyklovat pomocí hydrometalurgických metod, ale v praxi to není příliš časté z důvodu nízké ekonomické návratnosti. Obvykle se tedy v současnosti lithium neseperuje a zůstává ve strusce, která se využívá ve stavebnictví. K dalším nevýhodám (kromě ztráty lithia) patří vysoká spotřeba energie a nutnost čištění plynů. Naopak výhodou pyrometalurgického zpracování je relativní jednoduchost procesu bez nutnosti složité předúpravy.

Při **hydrometalurgických procesech** je aktivní materiál z baterií loužen ve vodných roztocích a cenné kovy jsou v několika krocích separovány a čištěny. Mezi hlavní výhody hydrometalurgických procesů oproti pyrometalurgickým patří úspora energie, vzhledem k tomu, že probíhají při nízkých teplotách. Dále je to možnost získání Li ve formě  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  a dalších kovů přímo využitelných pro výrobu nových katodových materiálů. Mezi hlavní nevýhody se řadí produkce odpadních vod, poměrně vysoká složitost procesu a zejména nutnost předúpravy baterií s cílem uvolnit aktivní materiál a učinit jej přístupným k loužení.

Jako loužicí činidla se tradičně používají silné anorganické kyseliny (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>). V poslední době se používají také organické kyseliny (citronová, octová, jablečná), které nepředstavují zátěž pro životní prostředí a je možné je recyklovat. Pro zvýšení účinnosti se přidává redukční činidlo, nejčastěji H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> nebo Na<sub>2</sub>SO<sub>5</sub>. V literatuře je popsáno množství hydrometalurgických metod testovaných laboratorně a je byla publikována řada přehledů testovaných činidel a reakčních podmínek. Některé popsané metody a jejich výsledky jsou shrnuty v následující tabulce:

Tab. Přehled zkoumaných laboratorních hydrometalurgických procesů [24]

Typ baterií	Činidla	T (°C)	Čas (h)	Výtěžek kovů (%)	Reference
LiNi <sub>0.8</sub> Co <sub>0.15</sub> Al <sub>0.05</sub> O <sub>2</sub>	1–4 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /HNO <sub>3</sub> /HCl	25–90	3–18	100% Li, 100% Co, 99.99%Ni	<a href="#">Joulié et al. (2014)</a>
LiCoO <sub>2</sub> , Li <sub>2</sub> CoMn <sub>3</sub> O <sub>8</sub> and (Li <sub>0.85</sub> Ni <sub>0.05</sub> )(NiO <sub>2</sub> )	1 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 50 g/L pulp density	95	4	93.4% Li, 66.2% Co, 96.3% Ni, 50.2% Mn.	<a href="#">Meshram et al. (2015b)</a>
LiCoO <sub>2</sub>	3 M HCl	90	1.5	99.4% Li	<a href="#">Guo et al. (2016)</a>
LiCoO <sub>2</sub> , Li <sub>2</sub> CoMn <sub>3</sub> O <sub>8</sub> and (Li <sub>0.85</sub> Ni <sub>0.05</sub> )(NiO <sub>2</sub> )	1 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 0.075 M NaHSO <sub>3</sub>	95	4	96.7% Li, 91.6% Co, 96.4% Ni, 87.9% Mn.	<a href="#">Meshram et al. (2015a)</a>
LiNi <sub>1/3</sub> Co <sub>1/3</sub> Mn <sub>1/3</sub> O <sub>2</sub>	1 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 1 vol% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	40	1	Li, Ni, Co, and Mn reached 99.7%	<a href="#">He et al. (2017)</a>
LiCoO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /HCl/citric acid + 0.55MH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	60	5	100% Li, 96% Co	<a href="#">Li et al. (2014)</a>
LiCoO <sub>2</sub>	1.0 M Oxalate + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	80	2	Li/Co > 98%	<a href="#">Sun and Qiu (2012)</a>
LiCoO <sub>2</sub>	1.0 M Oxalate + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	95	2.5	98% Li, 97% Co	<a href="#">Zeng et al. (2015b)</a>

Typ baterií	Činidla	T (°C)	Čas (h)	Výtěžek kovů (%)	Reference
LiCoO <sub>2</sub>	(0.5–2.0 M) Citric acid/Malic acid/Aspartic acid + (1.0–6.0)vol.% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	90	2	100% Li, 90% Co	<a href="#">Li et al. (2013)</a>
LiCoO <sub>2</sub>	1.25 M Ascorbic acid + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	70	1/3	98.5% Li, 94.8% Co	<a href="#">Li et al. (2012)</a>
LiCoO <sub>2</sub>	1.5 M Succinic acid + 1.0vol.%H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	70	2/3	96% Li, 100% Co	<a href="#">Li et al. (2015)</a>
LiCoO <sub>2</sub>	1 M iminodiacetic acid + 0.02 M maleic acid + ascorbic acid	80	6	99% Li, 91% Co	<a href="#">Nayaka et al. (2016a)</a>
LiCoO <sub>2</sub>	1.5 mol/L phosphoric acid 0.02 mol/L glucose	80	2	98% Co, 100% Li	<a href="#">Meng et al. (2017)</a>
LiCoO <sub>2</sub>	0.5 M Glycine + 0.02 M ascorbic acid	80	6	100% Li, 95% Co	<a href="#">Nayaka et al. (2016b)</a>
LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , LiCo <sub>x</sub> Mn <sub>y</sub> Ni <sub>z</sub> O <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> <sup>+</sup> (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	80	1	100%Co, 100%Cu 0%Al, 0%Mn, 40%Ni	<a href="#">Ku et al. (2016)</a>
LiCoO <sub>2</sub>	PVC	350	0.5	98% Li, 95% Co	<a href="#">Liu and Zhang (2016)</a>
LiCoO <sub>2</sub>	0.75 g/LCuSO <sub>4</sub> + Acidithiobacillus ferrooxidans + 1%pulp density		144	99.9% Co (With Cu <sup>2+</sup> ) 43.1%Co (WithoutCu <sup>2+</sup> )	<a href="#">Zeng et al. (2012a)</a>
LiCoO <sub>2</sub>	Citric, malic and gluconic acid produced by Aspergillus niger		336	100% Cu, 100% Li, 77% Mn, 75% Al, 64% Co, 54% Ni	<a href="#">Bahaloo-Horeh and Mousavi (2017)</a>
LiNi <sub>0.8</sub> Co <sub>0.15</sub> Al <sub>0.05</sub> O <sub>2</sub>	Citric acid/Gluconic acid/Oxalic acid + Aspergillus niger + 1% pulp density		72–336	100% Cu, 95% Li, 70% Mn, 65% Al, 45% Co, 38% Ni	<a href="#">Horeh et al. (2016)</a>

Typ baterií	Činidla	T (°C)	Čas (h)	Výtěžek kovů (%)	Reference
LiFePO <sub>4</sub> , LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , LiNi <sub>x</sub> Co <sub>y</sub> Mn <sub>1-x-y</sub> O <sub>2</sub>	H <sup>+</sup> /H <sup>+</sup> + Fe <sup>2+</sup> /H <sup>+</sup> + Fe <sup>3+</sup> + Sulfur-oxidizing bacteria/iron (II)-oxidizing bacteria + 1% pulp density		0–216	95%Li, 96%Co, 96%Mn, 97%Ni	<a href="#">Xin et al. (2016)</a>

## Průmyslové procesy pro recyklaci LIB

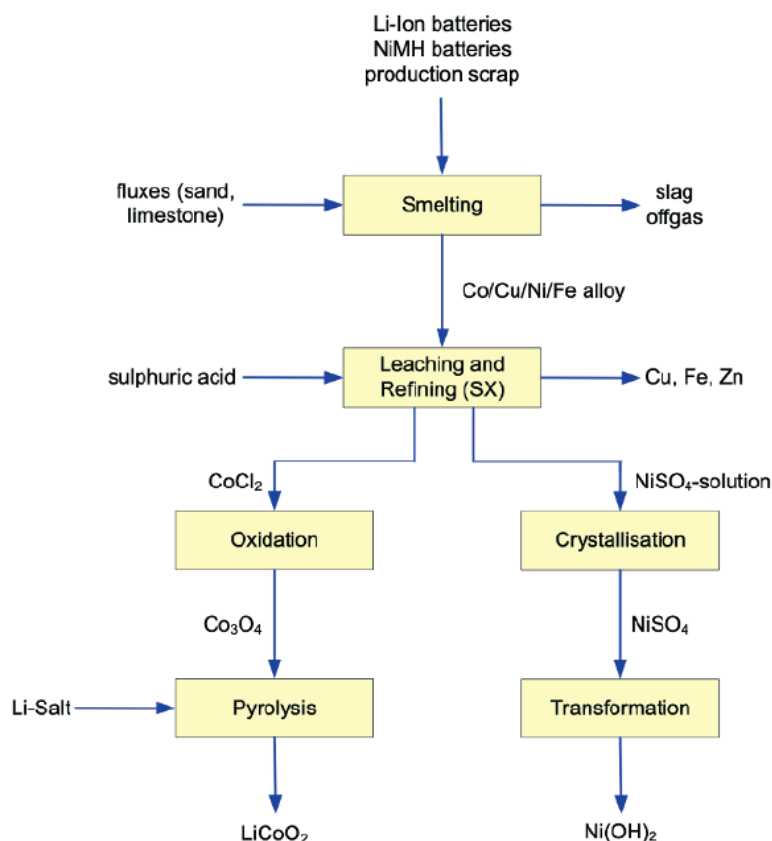
V této kapitole je uveden popis některých relevantních technologií pro recyklaci LIB používaných v průmyslovém měřítku [5], [12], [25]. Informace z praxe jsou ve většině případů značně omezené. U mnoha procesů navíc popis končí konstatováním, že koncentráty kovů jsou dodávány dalším společností k následnému zpracování a další detaily nejsou dohledatelné. V současné době jsou podle dostupných zdrojů v Evropě v provozu pouze čtyři závody o kapacitě nad 1.000 t za rok – belgický Umicore a německé firmy Accurec a Nickelhütte Aue využívají pyrometalurgické metody. V případě finské firmy Akkuser se zřejmě jedná pouze o mechanickou předúpravu baterií a získané produkty jsou dále předávány k pyrometalurgickému zpracování jiným společností.

### Umicore (<https://csm.umicore.com/en/battery-recycling/our-recycling-process>)

Umicore je společnost se sídlem v Belgii, která působí celosvětově v oblastech materiálů pro energetiku, katalyzátorů, recyklace aj. V belgickém Hobokenu provozuje závod na recyklaci Li-ion a NiMH baterií a odpadů z výroby baterií, s instalovanou roční kapacitou 7.000 t.

Materiál bez významnější předúpravy je nejprve zpracován pyrometalurgicky v pyrolyzní tavící peci za přídavku koksu, písku a vápence. V peci se nejprve při teplotě do 300 °C odpaří elektrolyt, následně při teplotě kolem 700 °C jsou pyrolyzovány plasty a grafit. Energie získaná z organických složek údajně stačí pro provoz celého procesu. V poslední zóně dochází k redukci a tavení materiálu za teploty 1200–1450 °C. Produktem je jednak slitina obsahující kobalt, nikl a měď, která se dále zpracovává hydrometalurgicky, dále struska obsahující lithium, hliník a mangan (při zpracování LIB), nebo kovy vzácných zemin (při zpracování NiMH baterií). Struska je využívána ve stavebnictví nebo může být také dále zpracována hydrometalurgicky pro

získání lithia nebo kovů vzácných zemin. Plynné produkty pyrolýzy jsou čištěny tzv. „UHT technologií“, která zajišťuje úplný rozklad organických látek. Fluor je zachycen v popílku, který je skládkován. Schéma procesu Umicore je uvedeno na Obr. 5.

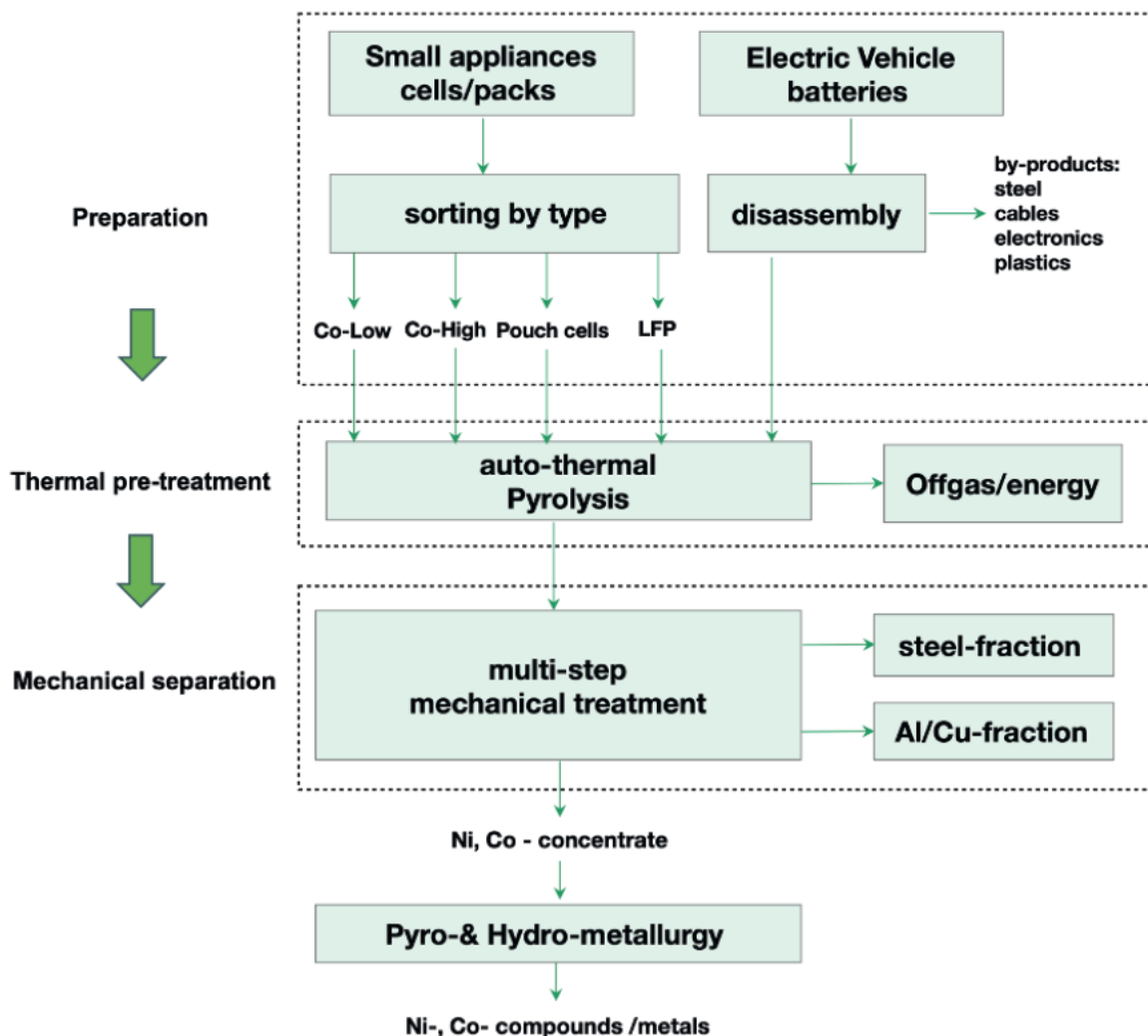


Obr. 7: Schéma procesu Umicore pro recyklaci Li-ion a NiMH baterií

**Accurec** (<https://accurec.de/lithium?lang=en>)

Německá firma Accurec Recycling GmbH zpracovává odpadní baterie všech typů. V roce 2016 firma otevřela nový recyklační závod ve městě Krefeld specializovaný na LIB, kde jsou recyklovány přenosné, průmyslové i automobilové baterie. Instalovaná roční kapacita je 3.000 t/rok. Proces recyklace začíná podle potřeby tříděním, rozmontováním a vybitím baterií. Následuje termální předúprava v rotační peci, kde jsou pyrolyzovány organické složky baterií, a to při teplotě do 600 °C, aby nedocházelo ke ztrátám hliníku. Pyrolyzované baterie jsou dále zpracovány mechanicky – tříděním, drcením a separací na jednotlivé frakce – ocel, frakce Al/Cu a katodový materiál bohatý na Co a Ni. Tyto frakce jsou odesílány k dalšímu zpracování jiným

společnostem – Fe, Al, Cu k hutnickému zpracování a koncentrát Co a Ni k pyrometalurgickému a následně hydrometalurgickému zpracování. Do budoucna má firma v plánu i recyklaci lithia a grafitu [25], ale aktuálně není zveřejněn předpokládaný časový harmonogram. Schéma procesu Accurec je uvedeno na Obr. 6.



Obr. 8: Schéma procesu recyklace LIB společnosti Accurec (2020), [25].

## Nickelhütte Aue

Nickelhütte Aue GmbH je tradiční pyrometalurická firma, která se také zabývá recyklací odpadních materiálů se zaměřením na nikl, měď, kobalt, vanad, molybden a vzácné kovy. Společnost provozuje recyklaci LIB kombinující pyrometalurgický a hydrometalurgický proces.



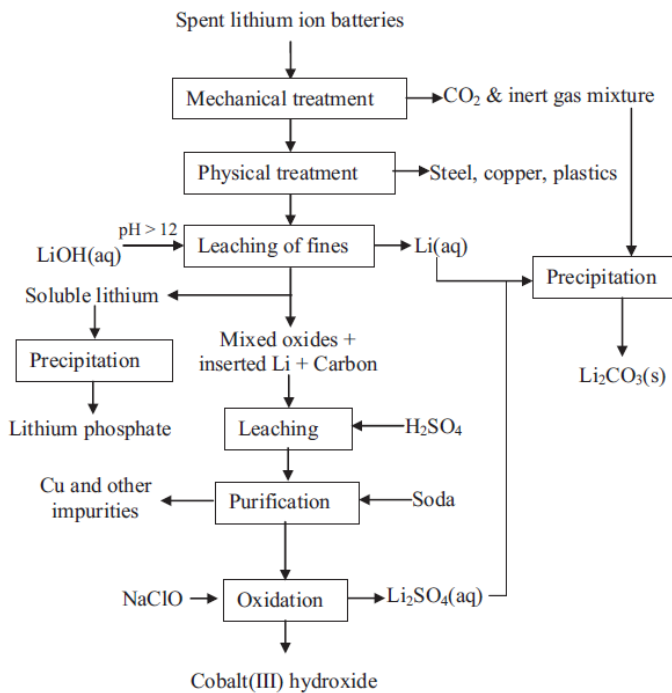
Termální krok je realizován vsádkově v bubnové peci nebo kontinuálně v rotační peci. Detaily ohledně dalšího hydrometalurgického zpracování nejsou známy. Roční kapacita je údajně 7.000 tun.

**Akkuser** (<https://www.akkuser.fi/en/process-descriptions/high-grade-cobalt-li-ion-battery/>)

Finská firma Akkuser provozuje mechanické zpracování baterií (tzv. Dry-technology). Zpracování spočívá ve dvoustupňovém drcení v ochranné atmosféře dusíku, s následnou magnetickou a mechanickou separací. Získaný prášek s koncentrovanými kovy je předáván k pyrometalurgickému zpracování. Udávanou výhodou procesu je, že nespotebovává vodu, chemikálie ani teplo a nevyžaduje předúpravu baterií. Ovšem není zřejmé, jakým způsobem jsou čištěny odcházejí plyny, které musí obsahovat uvolnění elektrolyt a další organické složky. Udávaná kapacita závodu je 4.000 t/rok.

## **Recupyl**

Francouzská společnost Recupyl používá proces nazvaný Valibat, který kombinuje mechanickou předúpravu s hydrometalurgickým zpracováním. Schéma procesu je uvedeno na Obr. 7. Baterie jsou nejprve rozdrceny v inertní atmosféře, poté jsou mechanicky separovány plasty, ocel a měď. Jemný prášek je suspendován ve vodném roztoku a v několika krocích jsou pomocí hydrolýzy, loužení a srážení získány lithium ve formě  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  a kobalt ve formě  $\text{Co}(\text{OH})_2$ . Udávaná kapacita závodu v Grenoblu je 110 t/rok.



Obr. 9: Schéma procesu Recupyl (Valibat) [12].

## Batrec

Švýcarská společnost Batrec Industrie AG používá mechanickou předúpravu baterií drcením v inertní atmosféře  $\text{CO}_2$ , elektrolyt je zachycen jako kondenzát (dále nevyužívaný). Materiál je následně mechanicky tříděn a odeslán k hydrometalurgickému zpracování. Kapacita procesu je 200 t/rok. [5, 12]

## Retriev Technology (dříve Toxco) (<https://www.retrievtech.com/lithiumion>)

Společnost Retriev Technology působí v Kanadě a Spojených státech. Udávaná kapacita zařízení je 4.500 t baterií za rok, ovšem není jasné, zda se jedná o kapacitu čistě pro LIB nebo zda jde o všechny typy zpracovávaných baterií. Větší battery-packs (např. z 26 elektromobilů) jsou ručně rozebrány a separované články jsou dále zpracovány společně s menšími bateriemi (např. ze spotřební elektroniky). Baterie jsou vedeny do drtiče, který pracuje v prostředí vodného roztoku, aby se omezily emise plynů a prachu. Z tohoto procesu vystupují tři materiálové proudy: částice kovů (pevná frakce), kapalina obohacená o kovy a frakce plastového odpadu. Pevná frakce obsahuje v různém poměru hliník, měď a kobalt a je vyžita jako surovina k hutnímu zpracování. Kapalná frakce je solidifikována a odeslána k dalšímu zpracování.

## **Sony Sumimoto**

V Japonsku působící společnost využívá předúpravu kalcinací při teplotě 1000 °C, kdy jsou odstraněny plasty, elektrolyt a ostatní organické složky. Železo, měď a hliník jsou fyzikálně separovány. Zbývá frakce obsahuje především uhlík a aktivní katodový materiál a je podrobena hydrometalurgickému zpracování s cílem získání kobaltu. Lithium není separováno. Udávaná kapacita závodu je 150 t/rok.

## **Plánované provozy**

V loňském a letošním roce několik automobilek ve spojení s předními producenty baterií nebo katodových materiálů vyhlásili plány na stavbu velkých výrobních závodů na baterie umístěných v Evropě nebo USA. Jedná se pravděpodobně o reakci automobilek na globálně napjatou situaci na trhu (nejen) s bateriemi a snahu o zajištění dodávek baterií pro své elektromobily. Některé z těchto závodů mají v plánu také vyrábět katodové materiály a recyklovat použité baterie.

**Umicore a VW** mají v plánu vybudovat továrnu (pravděpodobně několik továren) v Evropě na výrobu katodových materiálů s úvodní kapacitou 20 GWh v roce 2025, která by se měla postupně zvyšovat až na 160 GWh ročně v roce 2030, což odpovídá produkci baterií pro cca 2,2 mil. elektromobilů [26], [27].

Strategické partnerství vyhlásila firma Umicore i s automobilkami **BMW a Audi** [28], [29].

**Northvolt a Volvo** oznámily plány na stavbu „gigatovárny“ ve Švédsku, kde mají být vyráběny nově vyvinuté baterie, s plánovanou kapacitou 50 GWh ročně, pokrývající produkci 500 tis. automobilů [30].

Tyto plány (podobně jako výše diskutovaný obrat některých velkých automobilek k bateriím typu LFP) napovídají, že produkce Li-ion baterií prochází, a i nadále bude procházet turbulentním vývojem. S velkou pravděpodobností bude výroba baterií navázána přímo na automobilky, které budou také zpracovávat použité baterie k dalšímu využití nebo recyklaci.

## 5. Reference

- [1] C. M. Costa, J. C. Barbosa, R. Gonçalves, H. Castro, F. J. D. Campo a S. Lanceros-Méndez, „Recycling and environmental issues of lithium-ion batteries: Advances, challenges and opportunities,“ *Energy Storage Materials*, sv. 37, p. 433–465, May 2021.
- [2] K. M. Winslow, S. J. Laux a T. G. Townsend, „A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries,“ *Resources, Conservation and Recycling*, sv. 129, pp. 263-277, 2018.
- [3] M. Romare a L. Dahllöf, „The life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions from lithium-ion batteries,“ IVL Svenska Miljöinstitutet, 2017.
- [4] „Tesla tweaks its battery chemistry: a closer look at silicon anode development,“ [Online]. Available: <https://chargedevs.com/features/tesla-tweaks-its-battery-chemistry-a-closer-look-at-silicon-anode-development/>.
- [5] E. Mossali, N. Picone, L. Gentilini, O. Rodríguez, J. M. Pérez a M. Colledani, „Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments,“ *Journal of Environmental Management*, sv. 264, p. 110500, June 2020.
- [6] M. Yoshio, R. J. Brodd a A. Kozawa, Editoři, *Lithium-Ion Batteries*, Springer New York, 2009.
- [7] „Types of Lithium-ion,“ [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>.
- [8] M. Sanders a C. Pillot, „Lithium-Ion Battery Raw Material Supply and Demand 2016-2025,“ [Online]. Available: [http://www.avicenne.com/pdf/Lithium-Ion Battery Raw Material Supply and Demand 2016-2025 C. Pillot - M. Sanders Presentation at AABC-US San Francisco June 2017.pdf](http://www.avicenne.com/pdf/Lithium-Ion%20Battery%20Raw%20Material%20Supply%20and%20Demand%202016-2025%20C.%20Pillot%20-%20M.%20Sanders%20Presentation%20at%20AABC-US%20San%20Francisco%20June%202017.pdf). [Přístup získán 12. 1. 2022].
- [9] IEA, „Global EV Outlook 2022,“ 2022. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>.
- [10] „Tesla will change the type of battery cells it uses in all its standard-range cars,“ [Online]. Available: <https://www.cnbc.com/2021/10/20/tesla-switching-to-lfp-batteries-in-all-standard-range-cars.html>.
- [11] „Volkswagen's plan on LFP use shifts hydroxide dominance narrative in EV sector,“ [Online]. Available: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/metals/031721-volkswagens-plan-on-lfp-use-shifts-hydroxide-dominance-narrative-in-ev-sector>.

- [12] P. Meshram, B. D. Pandey a T. R. Mankhand, „Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review,“ *Hydrometallurgy*, sv. 150, p. 192–208, December 2014.
- [13] J. Marek a L. Stehlík, „Abeceda baterií a akumulátorů,“ [Online]. Available: [www.battex.info](http://www.battex.info).
- [14] N. Lebedeva, F. D. Persio a L. Boon-Brett, „Lithium ion battery value chain and related opportunities for Europe,“ Petten, 2016.
- [15] C. Pillot, „The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2018-2030,“ [Online]. Available: [https://rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2019/02/Keynote\\_2\\_AVICENNE\\_Christophe-Pillot.pdf](https://rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2019/02/Keynote_2_AVICENNE_Christophe-Pillot.pdf). [Přístup získán 12. 1. 2022].
- [16] McKinsey & Company, „Powering up Sustainable Energy,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Sustainability/Our%20Insights/Powering%20up%20sustainable%20energy/Powering-up-sustainable-energy-vF.pdf>.
- [17] M. Kamran, M. Raugei a A. Hutchinson, „A dynamic material flow analysis of lithium-ion battery metals for electric vehicles and grid storage in the UK: Assessing the impact of shared mobility and end-of-life strategies,“ *Resources, Conservation and Recycling*, sv. 167, p. 105412, April 2021.
- [18] S. Bobba, F. Mathieux a G. A. Blengini, „How will second-use of batteries affect stocks and flows in the EU? A model for traction Li-ion batteries,“ *Resources, Conservation and Recycling*, sv. 145, p. 279–291, June 2019.
- [19] D. Thompson, C. Hyde, J. M. Hartley, A. P. Abbott, P. A. Anderson a G. D. J. Harper, „To shred or not to shred: A comparative techno-economic assessment of lithium ion battery hydrometallurgical recycling retaining value and improving circularity in LIB supply chains,“ *Resources, Conservation and Recycling*, sv. 175, p. 105741, December 2021.
- [20] „Centrum dopravního výzkumu - Registrace nových osobních vozidel v ČR,“ [Online]. Available: <https://www.civinet.cz/registrace-vozidel-v-cr>. [Přístup získán 12. 1. 2022].
- [21] D. Steward, A. Mayyas a M. Mann, „Economics and Challenges of Li-Ion Battery Recycling from End-of-Life Vehicles,“ *Procedia Manufacturing*, sv. 33, p. 272–279, 2019.
- [22] „The Dark Side of the Congo's Cobalt Rush,“ [Online]. Available: <https://www.newyorker.com/magazine/2021/05/31/the-dark-side-of-congos-cobalt-rush>.
- [23] „The EV boom is being fueled by underpaid, underfed cobalt miners,“ [Online]. Available: <https://www.theverge.com/2022/2/15/22933022/cobalt-mining-ev-electriv-vehicle-working-conditions-congo>.
- [24] M.-M. Wang, C.-C. Zhang a F.-S. Zhang, „Recycling of spent lithium-ion battery with polyvinyl chloride by mechanochemical process,“ *Waste Management*, sv. 67, p. 232–239, September 2017.
- [25] R. Sojka, Q. Pan a L. Billmann, „Comparative study of Li-ion battery recycling processes,“ 2020. [Online]. Available: <https://accurec.de/wp-content/uploads/2021/04/Accurec-Comparative-study.pdf>.

- [26] „Umicore and Volkswagen AG to create European EV battery materials Joint Venture,“ [Online]. Available: <https://www.umicore.com/en/newsroom/news/umicore-and-volkswagen-ag-to-create-european-ev-battery-materials-joint-venture/>.
- [27] „Volkswagen AG Salzgitter Plant,“ [Online]. Available: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/volkswagen-ag-salzgitter-plant-6592>.
- [28] „BMW Group, Northvolt and Umicore join forces to develop sustainable life cycle loop for batteries,“ [Online]. Available: <https://www.umicore.com/en/newsroom/news/bmw-group-northvolt-and-umicore-join-forces-to-develop-sustainable-life-cycle-loop-for-batteries/>.
- [29] „Audi and BMW team up with Umicore on EV battery recycling,“ [Online]. Available: <https://internetofbusiness.com/audi-and-bmw-team-up-with-umicore-on-ev-battery-recycling/>.
- [30] „Volvo And Northvolt's Battery Gigafactory Will Be Built In Sweden,“ [Online]. Available: <https://insideevs.com/news/565403/volvo-northvolt-battery-gigafactory-sweden/>.