



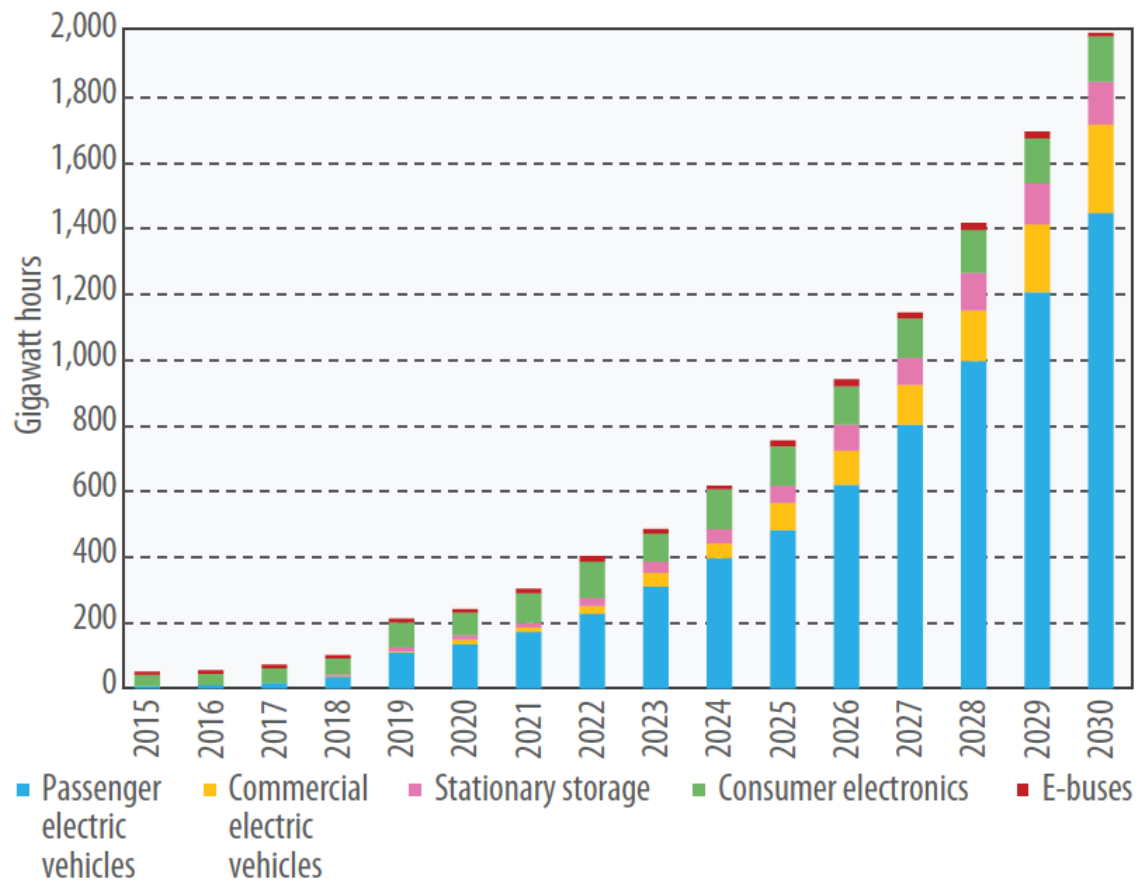
Recyklace Li-ion akumulátorů

Autor: Jiří Báňa

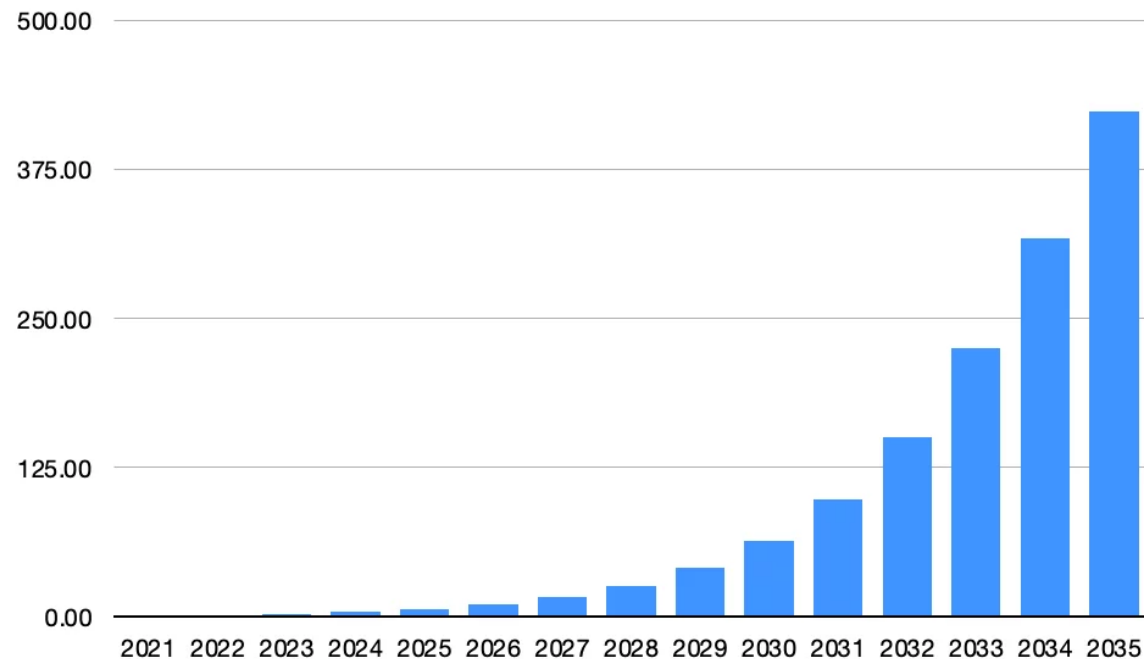
Hustopeče 15.10.2025



Produkce LIB



Light electric vehicle batteries, available for recycling (GWh, global market)



Obr.1: Světové využití Li-ion baterií



Veškerá recyklace musí nejpozději do 31. prosince 2031 dosáhnout alespoň následujících cílů pro zpětné získávání materiálů:

- 95 % pro Co
- 95 % pro Cu
- 95 % pro Ni
- 80 % pro Li
- Celková účinnost nad 70% hmotnosti baterie

REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC

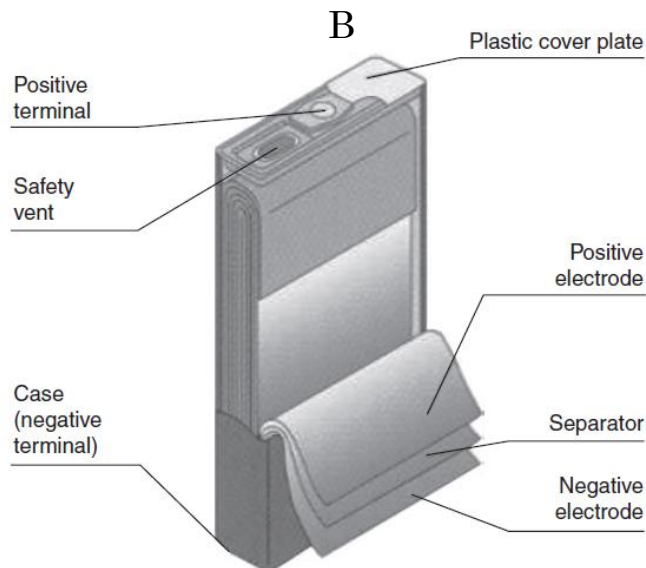
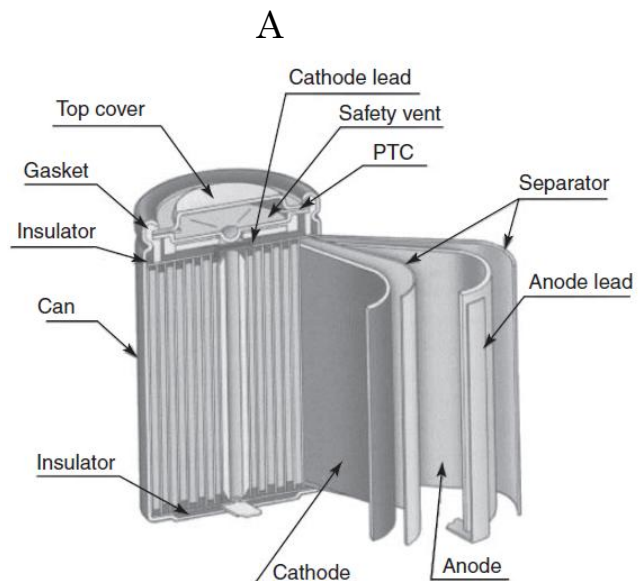
Materiál LIB	Al	Cu	Co	Grafit	Li	Mn	Ni	P	Fe
CRA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗



Produkce LIB

Složení baterie:

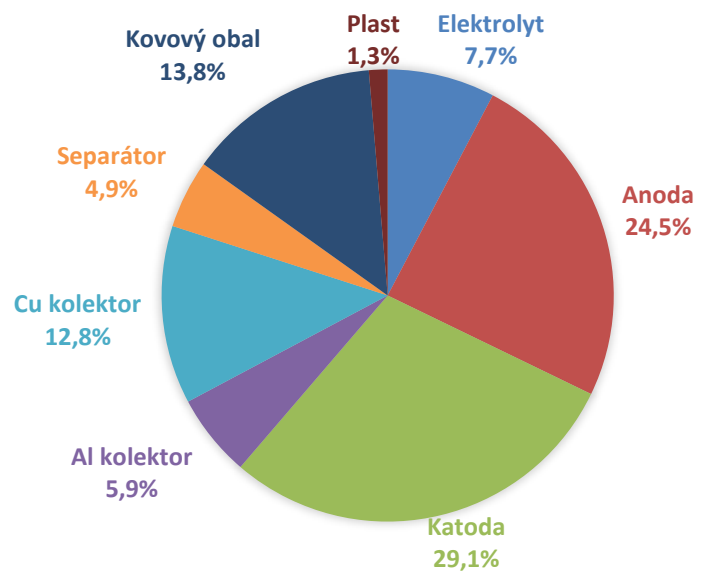
Anoda	—	Grafit, LTO
Katoda	—	LFP, NMC, NCA..
Elektrolyt	—	LiPF_6
Separátor	—	PE, PP
Proudový sběrač	—	Cu, Al
Obal	—	Kov, plast



Obr.1: Baterie dle designu: A) Cylindrická B) Prismatická, C) Pouch



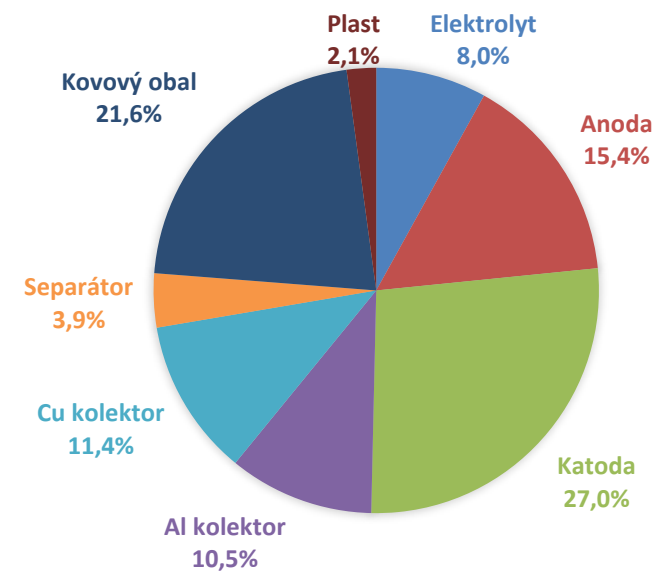
Složení LIB



Obr.4: Složení Panasonic NCA 18650 baterie

Cu	12,8 %
Li	2,1%
Al	6,3%
Co	2,7%
Ni	14,3%
Fe	13,8%

52% (38,2% bez Fe)



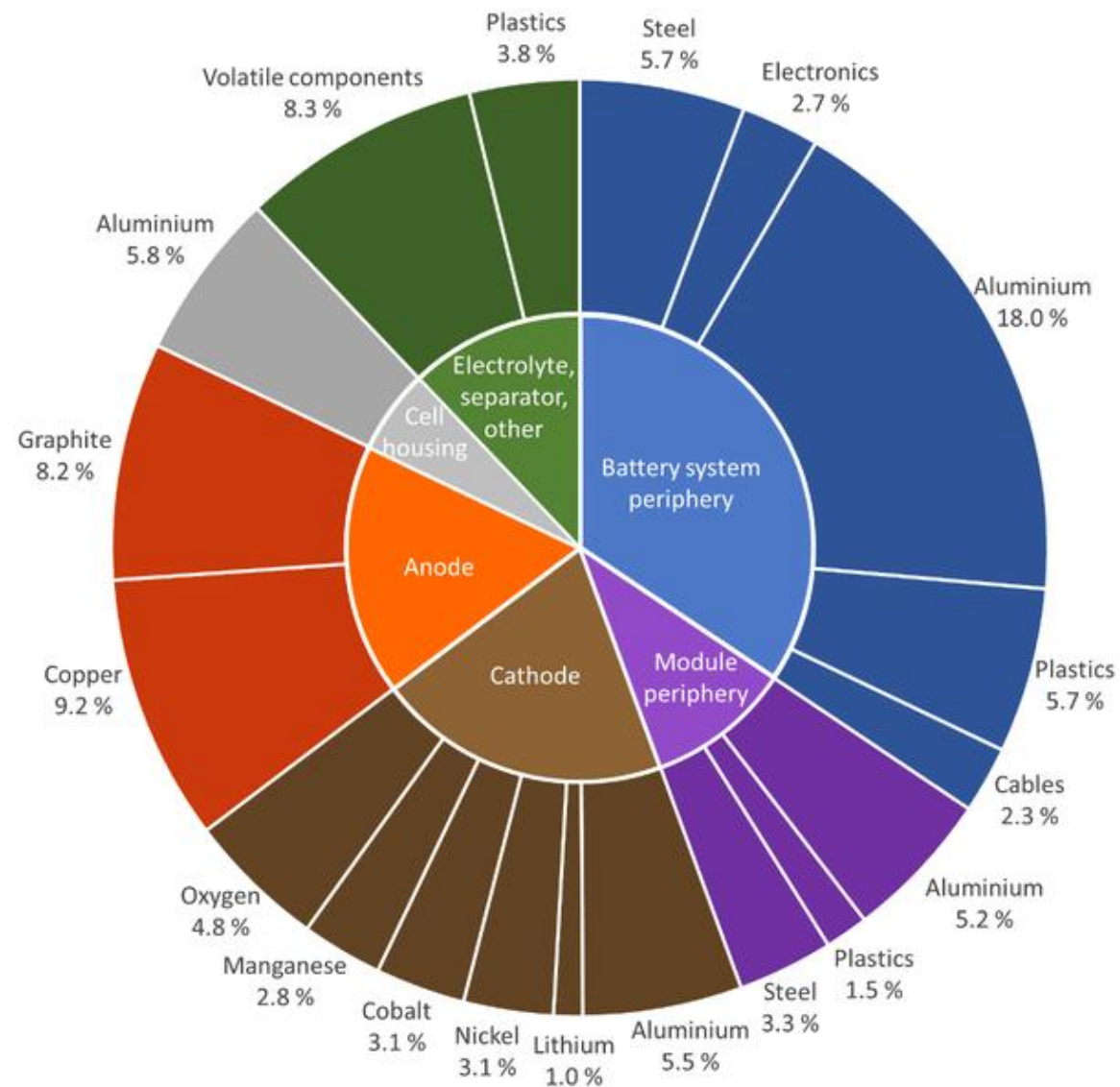
Obr.5: Složení Motoma LFP 18650 baterie

Cu	11,4 %
Li	1,2%
Al	10,5%
Fe	31,4%

54% (22,6% bez Fe)



Složení LIB



Co	3%
Ni	3%
Mn	3%
Cu	10 %
Li	1%
Al	29%
Ocel	9 %

58%

Obr.3: Složení NMC battery packu

Recyklační procesy LIB

Pyrometalurgická recyklace (Pyro)

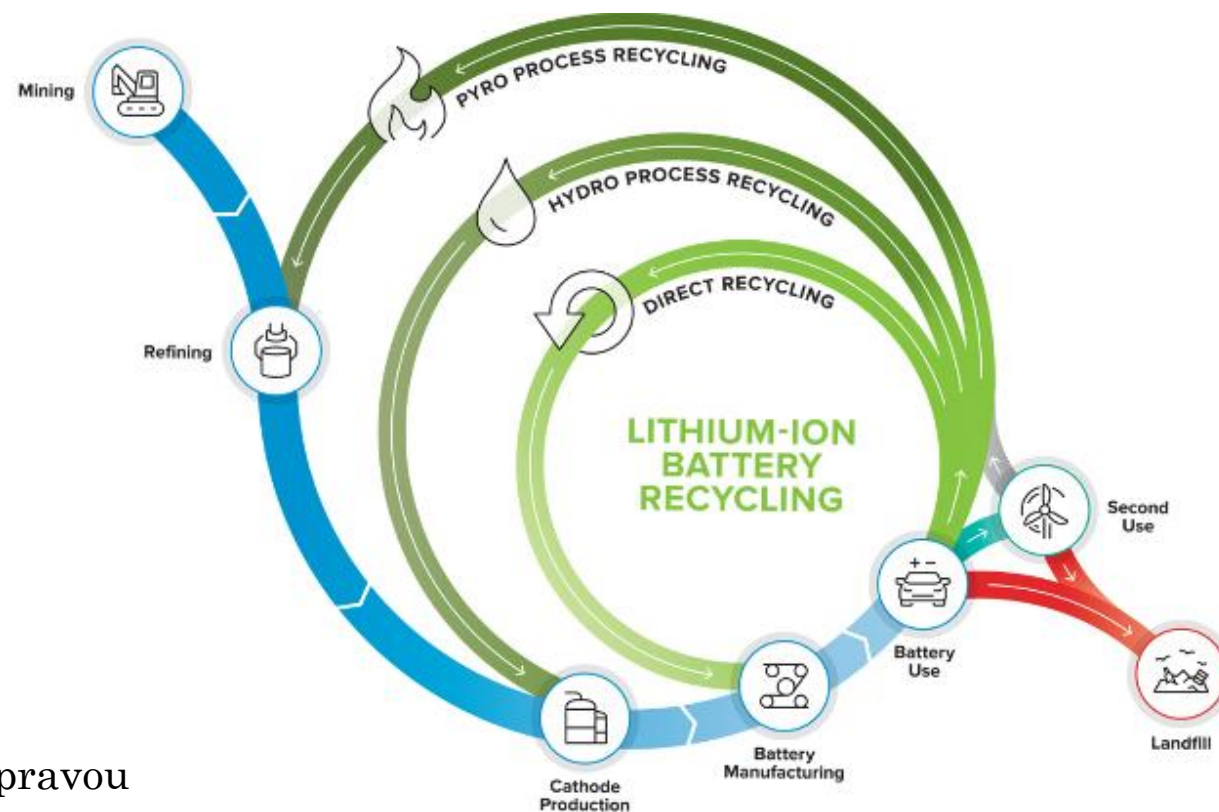
- Vysokoteplotní tavení

Hydrometalurgická recyklace (Hydro)

- Mechanická předúprava s následným loužením

Přímá recyklace

- Opětovné využití aktivních materiálů s minimální úpravou



Obr.6: Cesta LIB: od těžby po recyklaci

Pyrometalurgický proces

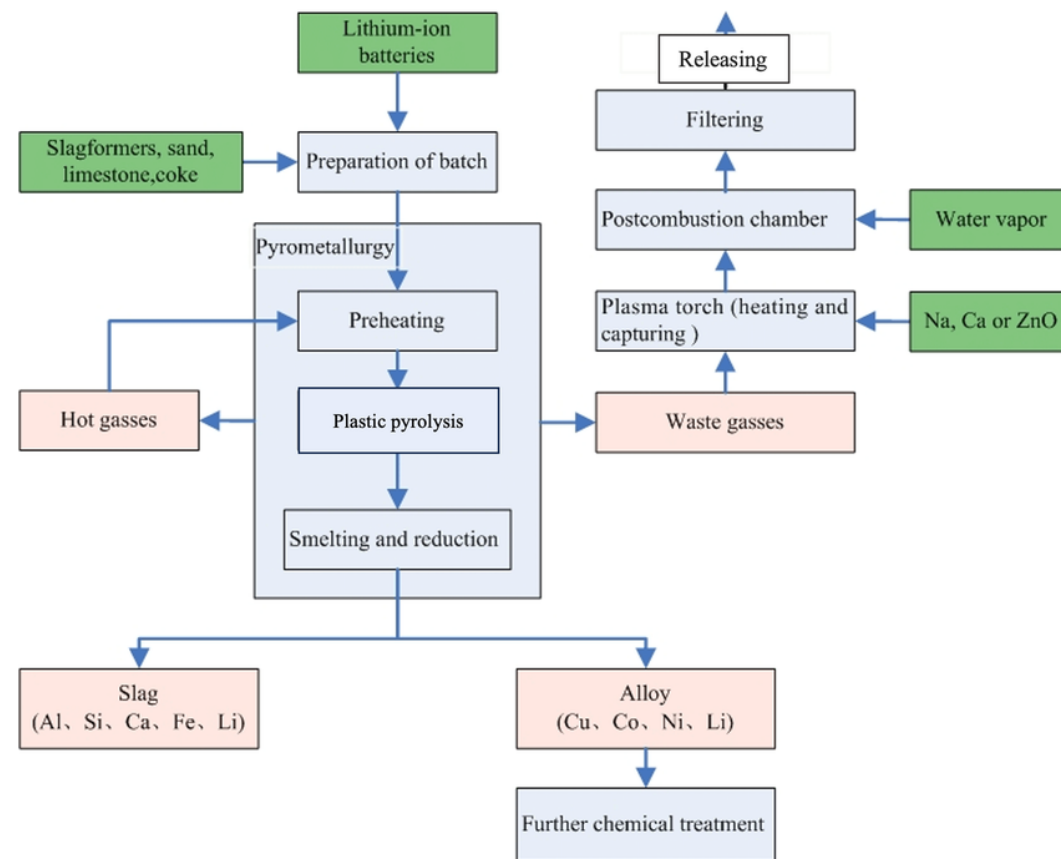
- Vysoká pec + struskotvorné přísady
- Slitina Cu, Co, Ni, Fe
- Vznik toxických plynů
- Ztráta grafitu a organických komponent
- Možnost hydrometalurgického zpracování strusky

Výhody:

- Funguje pro různé chemie baterií (NiMH)

Nevýhody: Účinnost

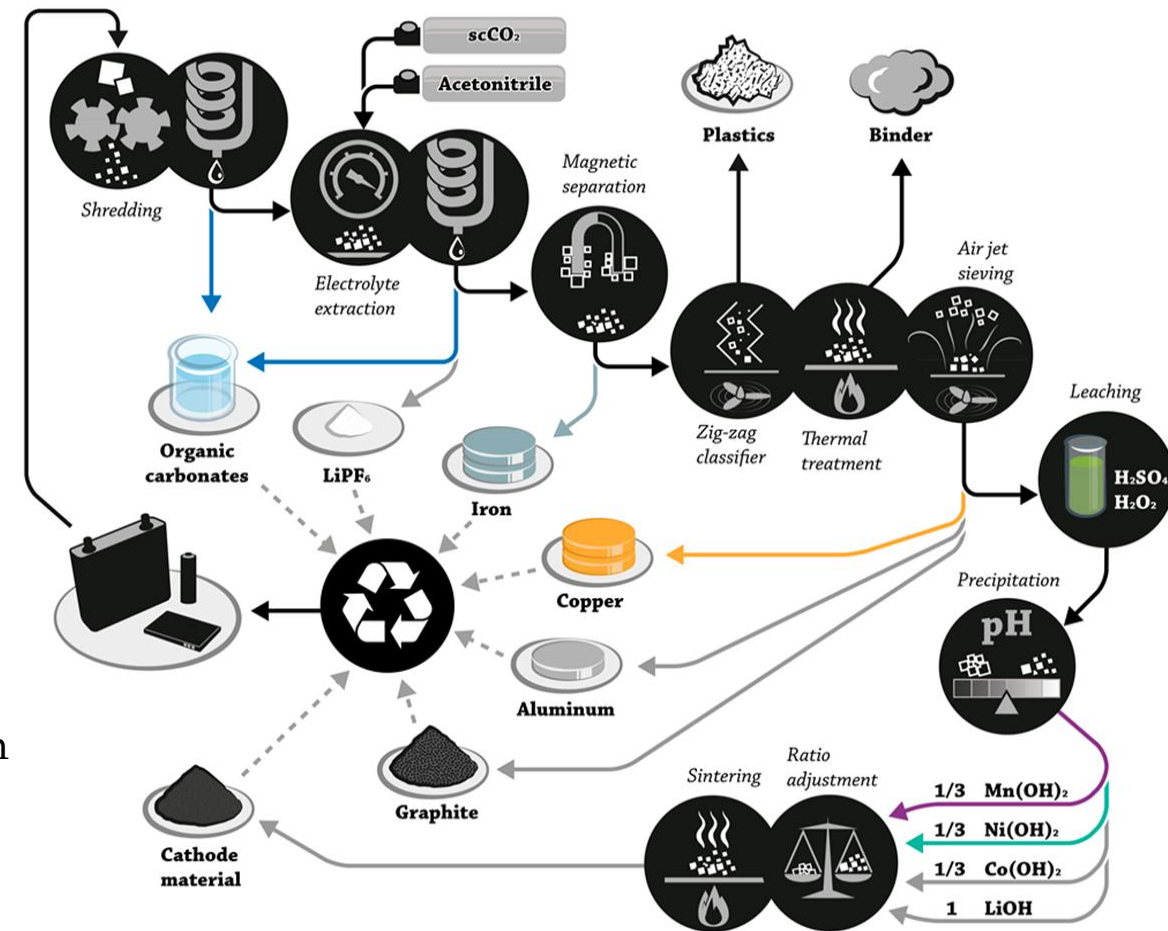
- Vysoká energetická náročnost, ztráta Li
- NMC - 35% s následnou hydrometalurgií až 60%
- LFP - 35% s následnou hydrometalurgií až 55%



Obr.7: Pyrometalurgická recyklace firmy Umicore

Hydrometalurgický proces

- Drcení baterií a separace
- Třídění materiálů
- Louhování elektrod v kyselinách
- $2\text{LiMO}_2 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{MSO}_4 + \text{Li}_2\text{SO}_4 + 3\text{H}_2\text{O} + 12\text{O}_2$
- Soli kyselin $\rightarrow$ hydroxidy
- Výsledkem jsou prekurzory pro syntézu elektrodových materiálů
- Relativně šetrná metoda k životnímu prostředí
- Účinnost procesu až 95%



Obr.8: Hydrometalurgická recyklace firmy Duesenfeld



Hydrometalurgický proces

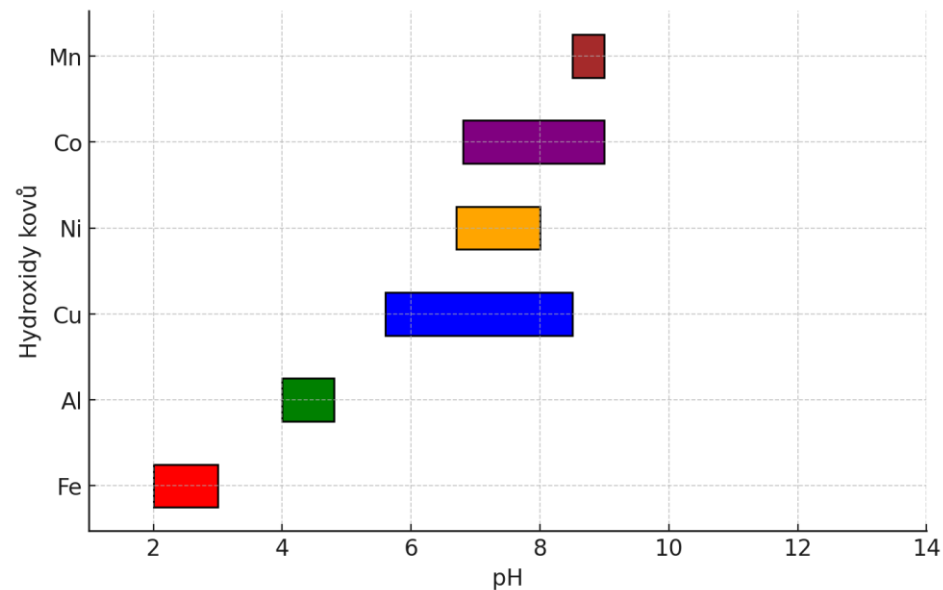
- Komplexní a složitý proces
- Předúprava, drcení, louhování..
- Různé druhy složení a chemií baterií
- NMC, LFP, NCA, cylindrické, pouch...
- Manipulace s nebezpečnými látkami
- Teplotní odstranění pojiv vede k poškození grafitu

Výhody & Nevýhody :

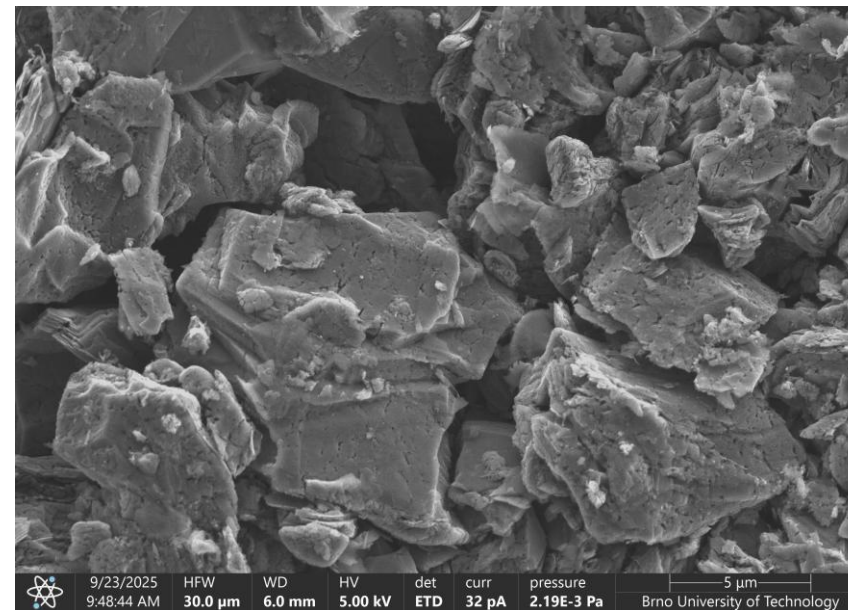
- Vysoká výtěžnost kovů, získání Li a grafitu
- Náročná separace, využití chemikálií

Účinnost

- LFP - až 75%
- NMC - až 95%



Obr.9: pH srážení hydroxidů různých kovů



Obr.10: Grafit při 450°C bez inertní atmosféry



Hydrometalurgický proces – alternativní metody a rozpouštědla

Biolouhování

- Nízká efektivita loužení
- Časové náročný proces

Louhování glycinem

- Glycin tvoří stabilní komplexy s širokou řadou kovů, což umožňuje selektivní louhování
- Netoxický, biodegradabilní, lze opakovaně využít
- Pomalá kinetika, nelze efektivně a rentabilně škálovat

Eutektická rozpouštědla

- Environmentálně šetrná rozpouštědla vzniklá mísením dvou nebo více komponent
- Cholinchlorid, etylenglykol
- Slibná alternativa tradičních minerálních nebo organických kyselin
- Nutná zvýšená teplota (220°C)



Hydrometalurgický proces – elektrochemické srážení elektrodpozice

Elektrodpozice

- Využívá rozdílných standardních elektrodoých potenciálů kovů
- Dochází k redukci a vyloučení kovů
- Řízení aplikovaného potenciálu umožňuje selektivní srážení jednoho kovu
- Vysoká čistota produktu (často > 99 %)
- Používají se inertní katody, nejčastěji nerezová ocel, ze které lze vysrážený kov ve formě prášku nebo plátů snadno odstranit.
- Hlavní provozní náklad tvoří spotřeba elektrické energie
- Vyšší počáteční investice do zařízení (potenciostaty)
- Nížší spotřeba chemikálií a tvorba odpadních solí



Hydrometalurgický proces – elektrochemické srážení elektrodepozice

Elektrodepozice je pomalý proces, který je řízen fyzikálními a elektrochemickými parametry

Omezení přenosem hmoty (difuzí):

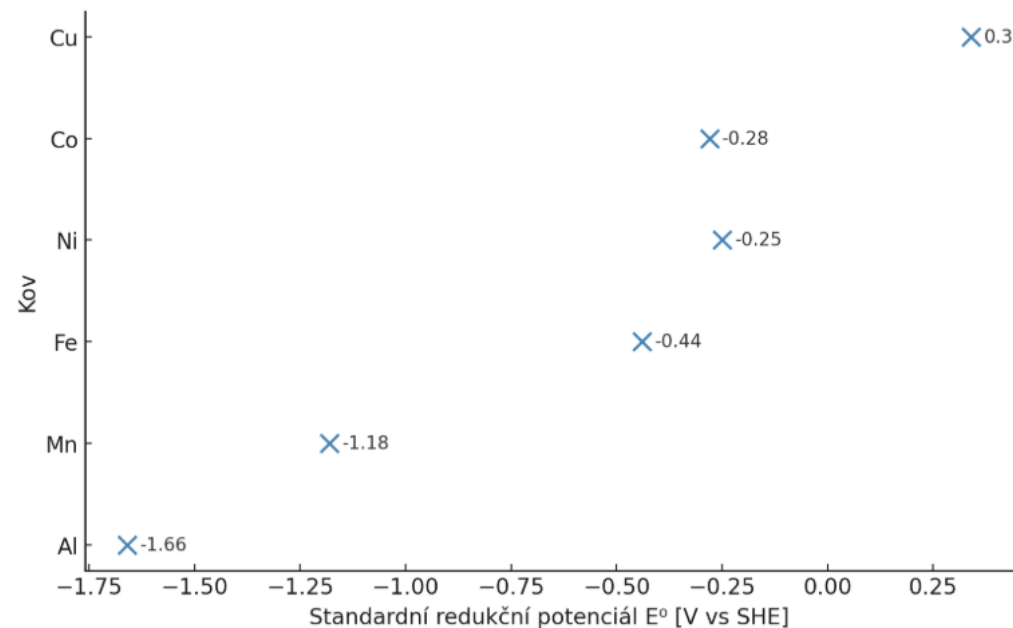
- Ionty kovů musí doputovat z objemu roztoku až k povrchu katody
- Relativně pomalý krok

Omezení proudovou hustotou:

- Při srážení z vodných roztoků je maximální použitelný proud omezen tím, kdy začne na katodě intenzivně probíhat vedlejší reakce vývoje vodíku.

Časová náročnost:

- Selektivní získání kovů ve vysoké čistotě typicky trvá hodiny (často 4–24 hodin) na jednu frakci kovu.



Obr.11: Redukční potenciál pro různé kovy

Kov (z NMC katody)	E° (V vs. SHE)
Co	-0,28
Ni	-0,25
Mn	-1,18
Li – zůstává v roztoku	-3,04



Ekonomické a environmentální výzvy

Vysoké provozní náklady:

- Složité procesy, používání chemikálií a čištění odpadních vod

Kolísání cen kovů:

- Ekonomická životaschopnost recyklace je ovlivněna tržními cenami získaných kovů

Logistika a doprava:

- Vytvoření efektivních sítí sběru a přepravy použitých LIB

Vznik odpadních vod:

- Používání velkého množství chemikálií vyžaduje před likvidací rozsáhlé a nákladné čištění.

Spotřeba chemikálií:

- Proces je závislý na značném množství chemických činidel

Potenciál emisí do ovzduší:

- Některé kroky v hydrometalurgii mohou vést k emisím do ovzduší

Spotřeba energie pro konkrétní kroky:

- Celková spotřeba energie je sice nižší než u pyrometalurgie, stále však významná



Přímá recyklace

- Technologie, která zatím existuje spíše v laboratorním měřítku
- Přímá regenerace aktivních materiálů LIB s minimálními strukturními změnami
- Čištění hydrotermální metodou a následná relitace

Výhody:

- Jednoduchost a rychlost procesu
- Zpětné využití aktivních materiálů s minimální energetickou zátěží

Nevýhody:

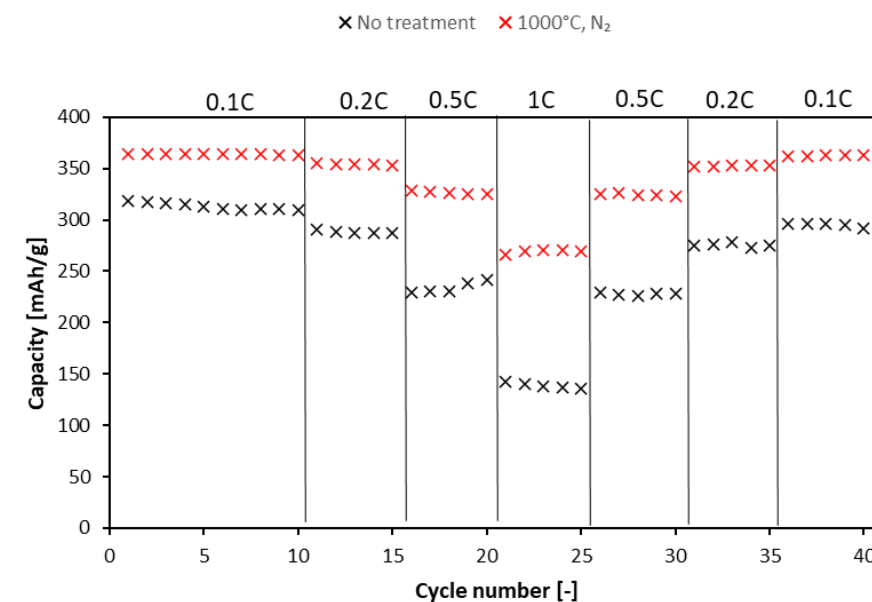
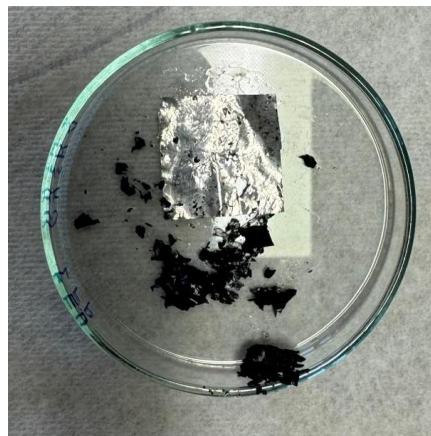
- Neflexibilní proces
- Nelze zaručit dostatečnou čistotu a požadovanou krystalickou strukturu

Přímá recyklace

- Rozpouštědlo pro anodu – H_2O
- Rozpouštědla pro katodu: TEP, NMP, DMSO, DMAC..
- Pojivo katody nelze dokonale rozpustit
- Schopnost rozpouštědla oddělit katodu od proudového sběrače závisí na výrobci a druhu pojiva (různé kopolymery PVDF)
- Nutno katodu oddělit mechanicky

Účinnost

- 90-100% pro LFP i NMC





Shrnutí recyklačních metod

Pyrometalurgická recyklace (Pyro)

- Ztráta grafitu, VOC i plastů
- NMC - 35% s následnou hydrometalurgií až 60%
- LFP - 35% s následnou hydrometalurgií až 55%
- *Nesplňuje legislativu EU (od 2026 65% hmotnosti)*

Hydrometalurgiická recyklace (Hydro)

- **Zachování grafitu, VOC i plastů**
- LFP - až 75%
- NMC - až 95%

Přímá recyklace

- 90-100% pro NMC i LFP
- Problém se selektivním rozpuštěním PVDF pro různé výrobce
- Zachování materiálů včetně pojiv



Děkuji za pozornost