

MEDŽIAGŲ, TINKANČIŲ AUTOMOBILIŲ AKUMULIATORIŲ BATERIJŲ GAMYBAI, VYSTYMO SI TENDENCIJOS

Kristupas Rofinbergas, Mantas Simonavičius, lekt. Zita Sluckuvienė

Šiaulių valstybinė kolegija, Aušros al. 40, Šiauliai

Anotacija. Straipsnyje apžvelgiama akumuliatorių baterijų gamybos istorija, nagrinėjamos medžiagos, tinkančios automobilių akumuliatorių baterijų gamybai bei apžvelgiamos alternatyvos ličio jonų baterijoms ir švino rūgšties akumulatoriams.

Pagrindiniai žodžiai: švino rūgšties akumulatoriai, ličio jonų, natrio jonų, vandenilio baterijos, baterijos elektromobiliams

Įvadas

Tyrimo aktualumas ir problematika. Lietuvoje eksploatuojamuose automobiliuose dažniausiai yra naudojamos sieros rūgšties ir švino plokštelių akumuliatorių baterijos, nes jos pigiau pagaminamos ir lengvai perdirbamos. Tačiau šios baterijos nėra ilgaamžiškos ir per ilgesnį nenaudojamo laiko tarpą, jos išsikrauna ir praranda savo talpą. Taip pat, tokio elektrolito tankio baterijos, turi ganėtinai mažą elektros energijos kiekį, palyginus su ličio jonų, arba gelio baterijomis. Stengdamiesi sumažinti šias problemas mokslininkai analizuoja, bando ir kuria naujus akumuliatorių baterijų tipus, užtikrinančius ilgaamžiškesnį ir tvaresnį baterijų naudojimą.

Tyrimo objektas – medžiagos akumuliatorių gamybai

Tyrimo tikslas – išnagrinėti medžiagų, tinkančių automobilių akumulatoriaus baterijų gamybai, vystymosi tendencijas.

Tyrimo uždaviniai:

1. Apžvelgti akumulatoriaus baterijų istoriją.
2. Identifikuoti automobilių baterijų konstrukciją ir jose naudojamas medžiagas.
3. Išanalizuoti medžiagas skirtas elektromobilių baterijoms.

Tyrimo metodai – mokslinės literatūros ir kitų informacijos šaltinių turinio analizė, sisteminimas ir apibendrinimas.

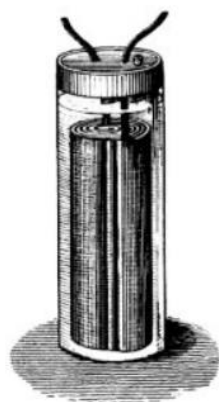
Akumulatoriaus baterijų medžiagų istorija

Pirmųjų baterijų istorija prasidėjo maždaug 1800 m., kai Aleksandras Volta sukūrė pirmąjį prietaisą, panašų į akumuliatorių bateriją (1 pav.) Jos konstrukcija gan paprasta: vario ir cinko diskai buvo atskirti kartonu išmirkytu druskos tirpale. Kontaktas tarp šių dviejų metalų sudaro potencialų skirtumą, įtampą. Didžiausias šios baterijos trūkumas buvo ant vario disko atsirandantys vandenilio burbulai, kurie padidina varžą.[1]



1 pav. Pirmoji Voltos baterija [1]

1836 m. Jonas Danielius patobulino Voltos bateriją, panaudodamas papildomą elektrolitą, kuris sugeria vandenilį. Mokslininkas variniame inde su vario sulfatu įdėjo cinką, kuris naudojamas kaip elektrodas. Šis patobulinimas celėje sukūrė pastovesnę elektros srovę. 1859 m. Gastonas Plante išrado pirmąją švino rūgšties bateriją, kurioje dvi švino plokštelės buvo panardintos sieros rūgšties elektrolite (2 pav.) Šio tipo akumuliatoriaus baterijas buvo galima pilnai iškrovus vėl įkrauti, todėl jos buvo daug pranašesnės už prieš tai buvusias. [3]



2 pav. Pirmoji švino rūgšties baterija [2]

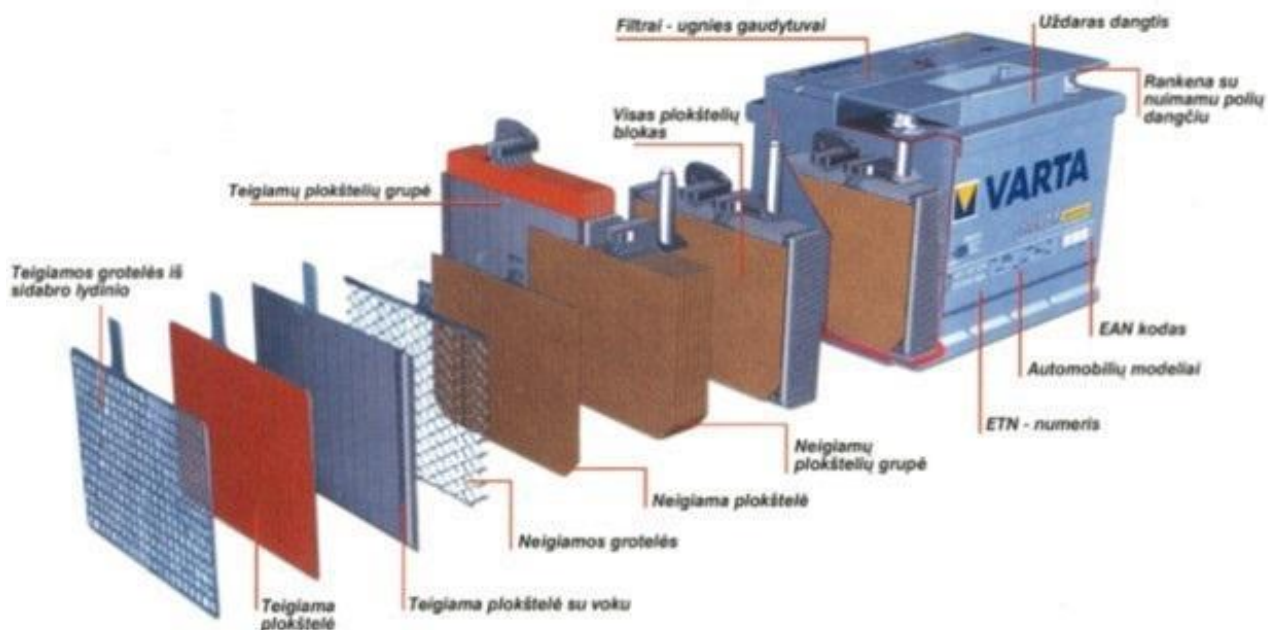
1899 m. Waldemaras Jugneris užpatentavo nikelio–kadmio bateriją, kurios krovimo galimybės buvo silpnesnės už švino rūgšties baterijas, tačiau gamybai naudotos daug pigesnės medžiagos. Nikelio-kadmio baterijų tipas turėjo trūkumų, nes pagrindinė sudedamoji dalis (kadmis), yra nuodinga žmogaus organizmui ir gyvūnams. Švino rūgšties, nikelio - kadmio baterijų talpa sumažėdavo, jeigu jos būdavo įkraunamos ne pilnai, bateriją iškrovus. Dėl tos priežasties šie energijos elementai buvo toliau tobulinami.

XX a. viduryje imtos naudoti nikelio oksido ir kadmio baterijos. XX a. antroje pusėje buvo sukurtos nikelio metalo hidrido baterijos, kurios pradėtos naudoti įvairiuose nešiojamuose įrenginiuose.

1980 m. buvo išrastos pirmosios ličio jonų baterijos, kurios galėjo būti įkraunamos nors ir ne pilnai iškrautos, ne taip kaip nikelio – kadmio baterijos. Be to mažesnis pasyvaus išsikrovimo kiekis ir didesnis galimos energijos sukaupimo kiekis parodo, jog šios baterijos daug pranašesnės už švino rūgšties, nikelio-kadmio ir pan. XXI a. pradžioje ličio jonų baterijos plačiai imtos naudoti elektrinių automobilių pramonėje. [4]

Švino rūgšties akumuliatoriai

Transporto priemonėse su vidaus degimo varikliais yra naudojami sieros rūgšties akumuliatoriai (3 pav.) sudaryti iš 6 švino plokštelių paketų.



3 pav. Šiuolaikinė švino rūgšties akumulatoriaus konstrukcija [5]

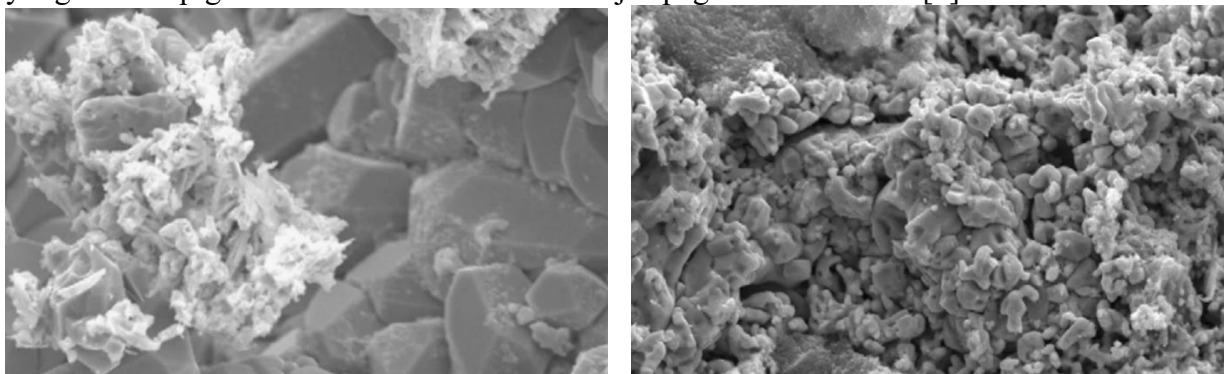
Šiuolaikiniame švino rūgšties baterijos dizaine elektrodai pagaminti iš plokščių švino gardelių, į kurias įspaudžiami švino dioksido milteliai. Tokia konstrukcija pagerina elektrodų sąveiką su elektrolitu, ir taip padidina akumulatoriaus talpą. Elektrolitas - vandeninis sieros rūgšties tirpalas, kuriame naudojamas tik distiliuotas vanduo, be druskų ir mechaninių dalelių, paveikiančių akumulatoriaus darbą. Svarbus parametras - elektrolito elektrinis laidumas, priklausantis nuo rūgšties koncentracijos ir temperatūros. Laidumas atitinka tankį, kuris dažniausiai matuojamas. Optimalus elektrolito tankis - $1,26 \text{ g/cm}^3$, norint gauti 35% rūgšties tirpalą.

Lentelė 1

Švino rūgšties baterijų privalumai ir trūkumai [6]

Privalumai	Trūkumai
Pigus perdirbimas	Nedidelis energijos tankis
Geras įkrovimo koeficientas (daugiau nei 70%)	Nėra ilgaamžiškos (iki 500 perkrovimo ciklų)
Galimi įvairūs dizainai, dydžiai ir talpos	Trumpasis įjungimas sugadina bateriją
Darbinė temperatūra $-40 \text{ }^\circ\text{C}$, $+60 \text{ }^\circ\text{C}$	Ilgą laiką nepakrovus baterijos prasideda sulfatacijos procesas ir baterija būna sugadinta.
Išvystyti gamybos procesai, todėl galima gaminti dideliais kiekiais	Švino plokštelėse yra arseno, kuris pavojingas gyvybei

Sumažinti švino rūgšties baterijų trūkumus galima naudojant anglines pridėtines medžiagas, kurios padidina akumulatoriaus ilgaamžiškumą bei energijos tankį. Anglis izoliuoja sulfidą ir mažina sulfatacijos efektą (4 pav.), taip padidina elektros laidumą tarp plokštelių. Taipogi, anglis kaip priedas yra ganėtinai pigus ir sudaro tik 1% visos baterijos pagaminimo kainos [7].

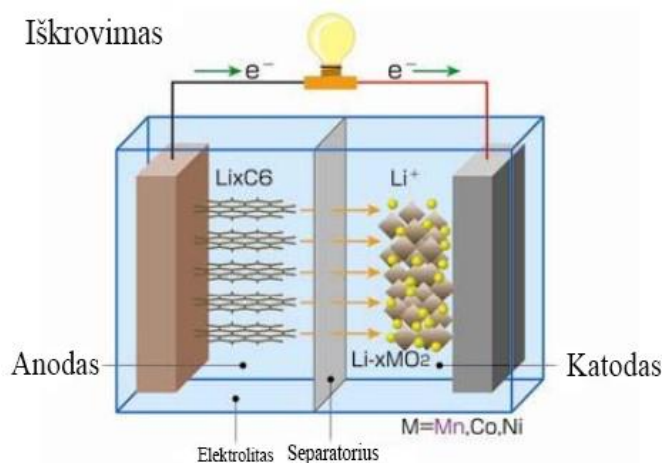


4 pav. Negatyvios švino plokštelės nuotraukos be pridėtinės anglies ir su papildoma anglimi [7]

4 pav. matomas švino sulfido kristalų susidarymas negatyvaus polio švino plokštelėje, kurioje anglies yra iki 0,1%. Šalia esančiame paveikslėlyje švino plokštelėje yra 2% anglies. Šitokio efekto mažinimas yra būtinas hibridiniuose automobiliuose, nes juose baterijos iškraunamos pusiau, o įkraunamos trumpais aukšto stiprio impulsais. Anglies priedas baterijose turi pozityvų efektą pusinio iškrovimo cikluose, tačiau yra ir neigiamų efektų: per didelis anglies kiekis gali sumažinti baterijos įkrovimo efektyvumą ir padidinti jos savaiminį išsikrovimą [8].

Ličio jonų baterijos

Ličio jonai juda tarp anodo ir katodo, sukurdami elektros srovę. Iškrovimo cikle litis anode yra jonizuojamas ir išskiriamas elektrolitui. Ličio jonai judėdami per plastikinį skyriklį prisijungia prie skylių katode, tuo pačiu metu elektronai išsiskiria iš anodo. Taip sudaroma elektros srovė, kuri patiekama išorinei elektros grandinei (5 pav.). Pakrovimo cikle ličio jonai grįžta iš katodo į anodą [10].



5 pav. Ličio jonų baterijos iškrovimo ciklas [10]

Šiuolaikinėse technologijose ličio jonų baterijos yra palankiausias naudojimui dėl savo didelio energijos potencialo, galios ir masės santykio, lengvumo. Taip pat ličio jonų baterijos turi daug didesnę energijos tankumą ir efektyvumą nei švino rūgšties ar nikelio - kadmio baterijos. [10]

Lentelė 2

Ličio jonų baterijos palyginimas su kitomis baterijomis [10]

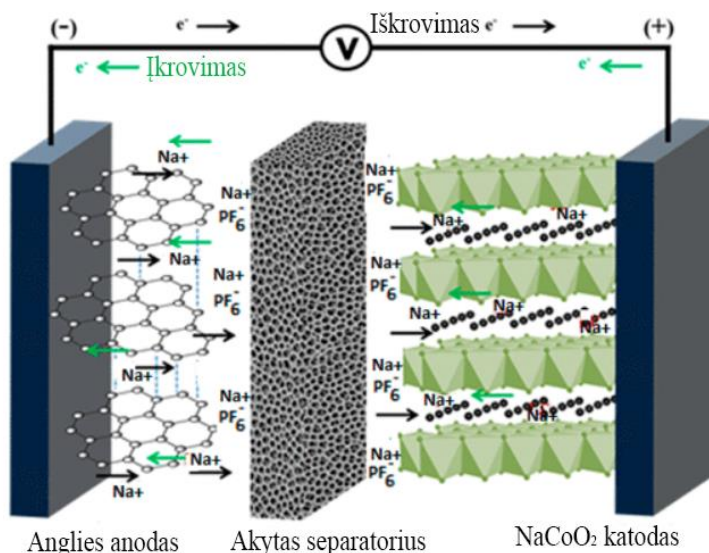
	Švino rūgšties baterija	Ličio jonų baterija	Natrio jonų baterija	Vandenilio baterija
Energijos ir masės tankis	30-50 Wh/kg	200-300 Wh/kg.	100-160 Wh/kg	40kWh/kg
Kaina per kW/h	\$50-\$150	\$130-\$150	\$80-\$120	\$200-\$400

Ličio jonų baterijos padeda žmonijai atsisakyti iškastinio kuro, kurio iškasimas ir naudojimas palieka labai didelį ekologinį pėdsaką. Verta apsvarstyti kokius ekologinius trūkumus gali turėti ir ličio jonų bei kitokio tipo baterijos, kurios naudojamos elektromobiliuose ar hibridiniuose automobiliuose. Šias ekologijos problemas galima apibrėžti nustatant maksimalų baterijos gyvavimo ciklą, medžiagų gamybą ir gavimą, perdirbimo galimybę, panaudojimą, produkto saugų pašalinimą [11]. Dėl didelio medžiagų kiekio, reikalingo gaminant naujas baterijas, atsiranda poreikis sandėliuoti šias medžiagas. Dabar pasaulyje yra pakankamai vietos laikyti palankių sąlygų patalpose šias žaliavas, tačiau gali iškilti problemų tolimesnėje ateityje. Yra nustatyta, jog ličio baterijoms reikalingų medžiagų neužteks visam pasauliui reikalingų elektromobilių kiekiui pagaminti. Taip pat ličio baterijas gerokai sunkiau perdirbti palyginus su švino rūgšties baterijomis, nes ličio baterijoje yra daug įvairesnių primaišytų medžiagų. Elektromobilyje, kurio baterijos yra ličio jonų pagrindu,

yra apie 100 celių, kas dar pasunkina perdirdimo procesą. Viena iš pagrindinių medžiagų dėl kurios labiausiai apsimoka perdirdinti ličio jonų baterijas yra kobaltas [9]. Apart jo baterijose esantis nikelis ir varis taip pat yra labai vertingi [11] [12]. Iš naujo panaudoti baterijas būtų galima paprastesniuose elektros įrenginiuose, kurie reikalauja mažesnio energijos sukaupti kiekio. [12]

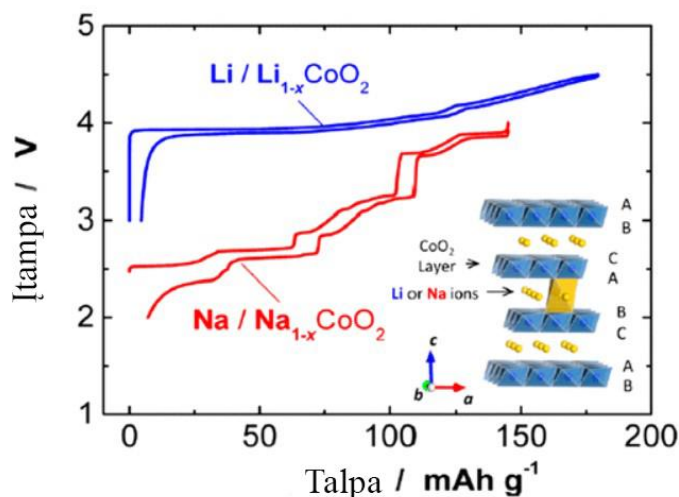
Natrio jonų baterijos

Šio tipo baterijos yra laikomos ličio jonų baterijų alternatyva, dėl panašaus veikimo principo (6 pav.) ir medžiagos prieinamumo bei mažesnės kainos. Natrio jonų baterijų technologijos vystymasis labai sparčiai auga, dėl panašumo su ličio jonų baterijomis. Vienas iš šio tipo baterijų trūkumų yra trumpesnis tarnavimo ciklas, mažesnis energijos tankumas nei ličio jonų baterijų. [13]



6 pav. Natrio jonų baterijos veikimas [15]

Vienoje ličio jonų baterijos celėje yra didesnė įtampa prie tam tikro talpos kiekio, o natrio jonų baterijoje yra mažesnis įtampos kiekis. Įtampos ir elektros talpos santykio palyginimas tarp ličio ir natrio jonų baterijų pateiktas 7 pav.



7 pav. Natrio ir ličio baterijų palyginimas [16]

Natrio jonų baterijų veikimo principas (6 pav.): įkraunamose baterijose natrio jonai juda iš teigiamo elektrodo, kuris sudarytas iš kompozicinės medžiagos, kurioje yra natrio, per elektrolitą į neigiamą iš anglies pagamintą elektrodą. Iškraunant, natrio jonai juda iš neigiamo atgal į teigiamą elektrodą, o elektronai teka priešinga kryptimi per išorinę grandinę, todėl gaunama elektros energija. [17]

Natrio jonų akumuliatorių privalumai:

- Gamtinės sąnaudos: natrio jonai yra paprastesni gamybos procese, todėl yra pigesni nei ličio baterijos.
- Energijos tankis: natrio jonų energijos tankis yra mažesnis nei ličio jonų baterijų, bet didesnis nei švino rūgšties akumuliatorių tankis.
- Saugumas: natrio jonų struktūra yra stabili, mažesnė terminio nutekėjimo rizika, o saugos rizika po fizinės žalos yra mažesnė nei ličio jonų baterija.
- Ciklų trukmė: natrio jonų ciklo trukmė yra ilgesnė nei švino rūgšties akumulatoriaus, o jo tarnavimo laikas yra ilgesnis nei švino rūgšties akumulatoriaus.
- Poveikis aplinkai: natrio jonai yra lengviau perdirbami nei švino rūgšties akumulatoriai ir ličio jonų baterijos.
- Kaina: yra 10% didesnė nei švino rūgšties baterijų. [17]

Pagrindinės kliūtys su kuriomis susiduriama naudojant natrio jonų baterijas:

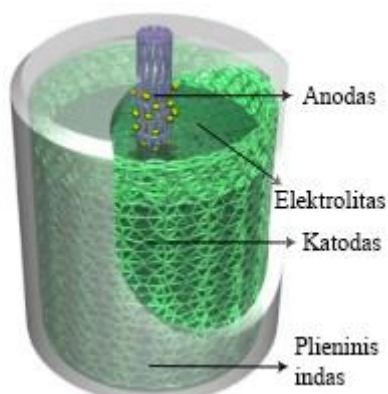
- Energijos tankis: natrio jonų baterijos turi mažesnę energijos tankį, palyginant su ličio jonų baterijomis. [14]
- Ciklo stabilumas: natrio jonų baterijų ciklo trukmė ir stabilumas dar nepasiekė tokio lygio kaip ličio jonų baterijos. Ypač esant greitam įkrovimui ir iškrovimui bei aukštai temperatūrai, akumulatoriaus veikimas žymiai pablogėja. [14]
- Elektrodo medžiagų optimizavimas: šiuo metu natrio jonų baterijų teigiamos elektrodo medžiagos dažniausiai yra pereinamojo metalo oksidai, o neigiamų elektrodo medžiagos daugiausia yra kietoji anglis. Šių medžiagų našumas ir jų kaina tiesiogiai veikia bendrą baterijos gamybos procesą.
- Elektrolitų gerinimas: šiuo metu naudojami skysti elektrolitai gali turėti saugos problemų, pvz., degumo ir korozijos.
- Jautrumas temperatūrai: Esant žemai temperatūrai, akumulatoriaus įkrovimo ir iškrovimo efektyvumas bei talpa gali labai sumažėti lyginant su ličio jonų baterijomis.
- Didelės apimtys gamyba ir taikymas: natrio jonų baterijų technologija vis dar gana atsilieka komercializavimo ir didelio masto pritaikymo srityje. Norint sumažinti gamybos sąnaudas, pagerinti gamybos efektyvumą ir parodyti jos patikimumą bei ekonominę naudą įvairiais taikymo scenarijais, reikia atlikti tolesnius tyrimus ir plėtrą. [17]

Vandenilio baterija

Vandenilio baterijos tai elektrocheminis prietaisas, galintis paversti sukauptą degalų cheminę energiją į elektros energiją. [18] Tačiau, kad ir kokios jos būtų efektyvios, kaina vienam automobilio ridos kilometrui yra 3 kartus didesnė, nei ličio jonų baterijos. [19]

Pagrindinės vandenilio baterijos dalys: (8 pav.)

- Anodas (neigiamas krūvis): vandenilis tiekiamas į anodą. Kai vandenilis susiduria su anodu, jis išsiskaido į protonus ir elektronus.
- Katodas (teigiamas krūvis): deguonis tiekiamas į katodą. Katode protonai, elektronai ir deguonis jungiasi, sudarydami vandenį ir šilumą.
- Elektrolitas: tai medžiaga, kuri leidžia praeiti tik teigiamai įkrautiems jonams.
- Katalizatorius: ši medžiaga palengvina cheminę reakciją tarp deguonies ir vandenilio. [20]



8 pav. Vandenilio baterijos cilindrinės celės sandara [23]

Vandenilio baterijos veikimo principas: kai vandenilis liečiasi su anodu, jis skyla į protonus ir elektronus. Protonai keliauja per elektrolitą į katodą, o elektronai keliauja per išorinę grandinę, gamindami elektros energiją. Pagaminta elektra maitina elektros variklį, kuris varo automobilio ratus, leisdamas jam judėti.

Gaminant vandenilį kyla šios problemos:

- Nuostoliai: vandenilio gamyba elektrolizės būdu yra efektyvi apie 80%, tačiau pusė energijos prarandama virsmo metu iš vandenilio į elektrą. [21]
- Saugumas: vandenilis yra labai degus ir lengvesnis už orą, todėl turi būti taikomi griežti saugumo reikalavimai. [21]
- Gamyba: gaminti vandenilį su atsinaujinančiais šaltiniais yra labai brangu, lyginant su ličio jonų baterijomis. [22]

Šiuo metu labai populiarėja elektromobiliai su ličio jonų baterijomis, dėl savo efektyvumo ir kainos. Tačiau atradus efektyvesnį būdą transportuoti ir gaminti vandenilį, automobiliai su vandenilio baterijomis gali tapti plačiai naudojami. 3 lentelėje pateikti kai kurių automobilių palyginimai.

Lentelė 3

Automobilių ir elektromobilių palyginimas [24] [25]

	Automobilis su vidaus degimo varikliu	Elektromobilis	Automobilis su vandenilio baterijomis
Naudingumo koeficientas	20-40%	77- 85%	38%
Suvartojimas 100 km	5l	22kWh	0,55kg
Kaina 100km	8€	4,84€	10€
Emisijos eksploatacijos metu	4,68 m ² tonų per metus	nėra	nėra

Išvados

Švino rūgšties baterijų istorija prasidėjo XIX a. viduryje. Pirmosios baterijos sudarytos iš dviejų švino plokštelių ir sieros rūgšties elektrolito. Nikelio - kadmio oksidas pradėtas naudoti XX a. viduryje, o antrojoje XX a. pusėje išrastos nikelio - metalo hidrido baterijos. Ličio jonų baterijos sukurtos XX a. priešpaskutiniame dešimtmetyje, o XXI a. pradžioje imtos naudoti plačiai elektromobilių pramonėje.

Šių dienų automobilių švino rūgšties baterijų konstrukcija yra sudaryta iš šešių švino plokštelių porų, prisotintų švino dioksido ir elektrolito. Tokio tipo baterijos turi savo privalumus ir trūkumus. Neigiamų aspektų sumažinimui yra naudojamas anglies priedas, kuris švino plokštelėje sumažina sulfatacijos procesą ir taip prailgina akumulatoriaus gyvavimo ciklą. Medžiagos akumulatoriuose švinas, sieros rūgštis. Jie naudojami dėl savo paprastumo ir lengvo perdirdimo, tokie akumulatoriai vis dar populiarūs, nes didžioji dalis automobilių yra su vidaus degimo varikliais.

Elektromobiliuose daugiausiai naudojamos ličio jonų baterijos, tačiau vis dar ieškoma alternatyvų. Patobulinius natrio jonų baterijas jas būtų galima plačiai naudoti elektromobilių pramonėje. Taipogi vandenilio baterijos yra sparčiai vystomos ir netolimoje ateityje galėtų būti plačiau naudojamos.

Literatūros sąrašas

1. Voltos baterija (2019) https://americanhistory.si.edu/collections/nmah_7032892 žiūrėta: 2024-03-01
2. Gaston plante lead acid battery (2023) https://www.cherrymortgages.com/historic_britain/Gaston_Plante_Lead_Acid_Battery.htm žiūrėta: 2024-03-01
3. Plante battery (2020) <https://nationalmaglab.org/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/museum/plante-battery-1859/> žiūrėta: 2024-03-02
4. History and evolution of batteries (2024) <https://www.monolithicpower.com/en/battery-management-systems/introduction-to-battery-technology/history-and-evolution> žiūrėta: 2024-03-02
5. Akumuliatorių veikimas, konstrukcija ir charakteristikos (2015) <https://www.visainfo.lt/akumuliatoriu-abc-akumulatoriaus-veikimas-konstrukcija-ir-charakteristikos-958> žiūrėta: 2024-03-02
6. Joey Jung, Lei Zhang, Jiujun Zhang. (2015) Lead-Acid Battery Technologies – Fundamentals, Materials, and Applications. CRC Press https://books.google.lt/books?id=I_cOCgAAQBAJ&printsec žiūrėta: 2024-03-04
7. Applications of carbon in lead-acid batteries (2019) <https://link.springer.com/article/10.1007/s10008-018-04174-5> žiūrėta: 2024-03-16
8. D. G. Enos, S. R. Ferreira, H. M. Barkholtz, W. Baca and S. Fenstermacher (2017) Understanding Function and Performance of Carbon Additives in Lead-Acid Batteries <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.1031713jes/meta> žiūrėta: 2024-03-20
9. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles (2020) <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1682-5> žiūrėta: 2024-03-23
10. Marcy Lowe, Saori Tokuoka, Tali Trigg and Gary Gereffi (2010) Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles [https://mdgs.un.org/unsd/trade/s_geneva2011/refdocs/RDs/Lithium-Ion%20Batteries%20\(Gereffi%20-%20May%202010\).pdf](https://mdgs.un.org/unsd/trade/s_geneva2011/refdocs/RDs/Lithium-Ion%20Batteries%20(Gereffi%20-%20May%202010).pdf) žiūrėta: 2024-03-27
11. T. Y. Chian, W. L. J. Wei, E. L. M. Ze, L. Z. Ren, Y. E. Ping, N. Z. Abu Bakar, M. Faizal and S. Sivakumar (2019) A Review on Recent Progress of Batteries for Electric Vehicles https://www.ripublication.com/ijaer19/ijaerv14n24_07.pdf žiūrėta: 2024-03-28
12. K. Richa, C. W. Babbitt, ir G. Gaustad, (2017) Eco Efficiency Analysis of a Lithium-Ion Battery Waste Hierarchy Inspired by Circular Economy, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/am-pdf/10.1111/jiec.12607> žiūrėta: 2024-04-07
13. Mirzaeian, M., Abbas, Q., Hunt, M. R., Galeyeva, A., & Raza, R. (2021) Na-Ion Batteries <https://durham-repository.worktribe.com/output/1649255> žiūrėta: 2024-04-07

14. Kei Kubota and Shinichi Komaba (2015) Review—Practical Issues and Future Perspective for Na-Ion Batteries <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.0151514jes/meta> žiūrėta: 2024-04-07
15. K. M. Abraham (2020) How Comparable Are Sodium-Ion Batteries to Lithium-Ion Counterparts? <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsenergylett.0c02181> žiūrėta: 2024-04-10
16. Yabuuchi, N.; Kubota, K.; Dahbi, M.; Komaba, S. (2014) Research Development on Sodium-Ion Batteries. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/cr500192f> žiūrėta: 2024-04-10
17. Galutinis natrio jonų akumuliatoriaus vadovas (2023) <https://www.lithiumbatterytech.com/lt/the-ultimate-guide-to-sodium-ion-battery/> žiūrėta: 2024-04-10
18. Vandenilio variklis. Germán Portillo <https://www.renovablesverdes.com/lt/vandenilio-kamino/> žiūrėta: 2024-04-15
19. Hydrogen Fuel Cell Efficiency: How Does it Compare to Lithium-ion? Flux Power <https://www.fluxpower.com/blog/hydrogen-fuel-cell-efficiency-how-does-it-compare-to-lithium-ion> žiūrėta: 2024-04-20
20. Nils Arnold, (2013) BMW Hydrogen fuel cell cars, <https://www.bmw.com/en/innovation/how-hydrogen-fuel-cell-cars-work.html> žiūrėta: 2024-04-20
21. Julie Campbell (2024) Hydrogen fuel and solid carbon build up https://www.hydrogenfuelnews.com/hydrogen-fuel-modern-gates/8564342/?utm_content=cmp-true žiūrėta: 2024-04-22
22. Julian Horsey (2024) New Hydrogen fuel cell makes zero-emission flights a possibility <https://www.geeky-gadgets.com/hydrogen-fuel-cell/> žiūrėta: 2024-04-23
23. A manganese–hydrogen battery with potential for grid-scale energy storage (2018) https://web.stanford.edu/group/cui_group/papers/WeiC_Cui_NATENG_2018.pdf žiūrėta: 2024-04-23
24. How much power does an electric car use? (2024) <https://www.energiguide.be/en/questions-answers/how-much-power-does-an-electric-car-use/212/> žiūrėta: 2024-04-23
25. Toyota Mirai breaks world record for distance driven with one fill of (2021) hydrogen <https://newsroom.toyota.eu/toyota-mirai-breaks-world-record-for-distance-driven-with-one-fill-of-hydrogen/> žiūrėta: 2024-04-24