

**Literatur Review : Analisa Performa Baterai *Lithium-air*, *Lithium-sulfur*, *All-Solid-State Battery*, *Lithium-ion* Pada Kendaraan Listrik**

**Muhammad Ulumul Khasan**

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia  
muhammadfebrianto@mhs.unesa.ac.id

**Farid Baskoro, Arif Widodo, Nur Kholis**

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia  
faridbaskoro@unesa.ac.id, arifwidodo@unesa.ac.id, nurkholis@unesa.ac.id

**Abstrak**

Perkembangan teknologi pada saat ini sangatlah cepat, dimana perkembangan teknologi pada bidang otomotif ikut merasakan dampaknya. Banyak produsen otomotif yang giat mengembangkan kendaraan mereka yang tadinya kendaraan berbahan bakar minyak menjadi kendaraan listrik. Mobil listrik membutuhkan baterai sebagai pemasok energinya, baterai yang paling umum digunakan adalah *lithium-ion*. Namun ada beberapa masalah pada *lithium-ion*, melihat dari keadaan ini pengembang telah meneliti beberapa alternatif jenis baterai yaitu: baterai *lithium-air*, baterai *lithium-sulfur*, *all-solid-state battery*. Literatur ini bertujuan untuk membandingkan performa dari baterai *lithium-air*, baterai *lithium-sulfur*, *all-solid-state battery* yang nantinya dapat menggantikan penggunaan baterai *lithium-ion* yang banyak digunakan saat ini pada kendaraan listrik. Pada literatur review ini menggunakan metode *systematic literatur review* (SLR) atau tinjauan pustaka sistematis, dengan mencari, mengumpulkan, dan mengevaluasi dari beberapa sumber yang terkait dengan topik ini. Dari ketiga baterai ini, baterai *lithium-sulfur* menawarkan energi spesifik yang besar dibandingkan dengan baterai *lithium-air*, baterai *all-solid-state*. Baterai *lithium-sulfur* telah mendapat perhatian lebih sehingga lebih cepat menuju komersialisasi masal daripada baterai *lithium-ion* maupun baterai *all-solid-state*. Hasil dari literatur ini adalah pada baterai *lithium-sulfur* memiliki kepadatan energi sebesar 2.500Wh/kg dan sudah melebihi kepadatan energi baterai *lithium-air* sebesar 250-1.200Wh/kg, *all-solid-state battery* sebesar 500Wh/kg, dan baterai *lithium-ion* sebesar 890Wh/kg. Kepadatan energi ini menyiratkan berapa banyak energi yang dapat ditampung. Perlu adanya pengembangan lebih pada baterai-baterai tersebut agar penggunaannya dapat dirasakan secepatnya.

**Kata Kunci :** Baterai *Lithium-air*, Baterai *Lithium-sulfur*, *All-Solid-State Battery*, *Lithium-ion*

**Abstract**

*Development of technology at this time is very fast, where technological developments in the automotive sector also feel the impact. Many automotive manufacturers are actively developing their vehicles from oil-fueled vehicles to electric vehicles. Electric cars need batteries as their energy supplier, the most commonly used battery is lithium-ion. However, there are several problems with lithium-ion, seeing from this situation the developer has researched several alternative types of batteries, namely: Lithium-air batteries, lithium-sulfur batteries, all-solid-state batteries. This literature aims to compare the performance of Lithium-air batteries, Lithium-sulfur batteries, all-solid-state batteries which can later replace the use of lithium-ion batteries that are widely used today in electric vehicles. In this literature review, the systematic literature review (SLR) method or systematic literature review is used, by searching, collecting, and evaluating from several sources related to this topic. Of these three batteries, lithium-sulfur batteries offer a large amount of specific energy compared to lithium-air, all-solid-state batteries. Lithium-sulfur batteries have received more attention and are therefore faster towards mass commercialization than lithium-ion batteries or all-solid-state batteries. The results of this literature are that lithium-sulfur batteries have an energy density of 2,500Wh/kg and have exceeded the energy density of lithium-air batteries of 250-1,200Wh/kg, all-solid-state batteries of 500Wh/kg, and lithium-air batteries of 890Wh/kg. This energy density implies how much energy it can hold. There needs to be more development on these batteries so that their use can be felt as soon as possible.*

**Keyword:** Battery *Lithium-air*, Battery *Lithium-sulfur*, *All-Solid-State Battery*, *Lithium-ion*

**PENDAHULUAN**

Pada saat ini lebih dari 80% permintaan energi global dipasok oleh bahan bakar fosil. Penggunaan energi fosil di seluruh dunia ini menyebabkan pelepasan besar-besaran, karbon dioksida dan gas rumah kaca lainnya yang menyebabkan masalah

perubahan iklim global. Minyak bumi yang dikonsumsi dalam aplikasi mobil menghasilkan sepertiga dari gas rumah kaca yang dilepaskan (Liu et al., 2020). Perkembangan teknologi saat ini berjalan sangat pesat, salah satunya perkembangan teknologi pada bidang otomotif. Semakin banyak

produsen otomotif yang giat mengembangkan kendaraan mereka yang tadinya kendaraan berbahan bakar minyak menjadi kendaraan listrik (*electrical vehicle*). Kendaraan listrik ini sangat diperhitungkan dipasaran dunia saat ini dikarenakan akan menjadi solusi pengganti kendaraan dengan bahan bakar minyak sebagai energi utama pada masa depan. Pada kendaraan listrik baterai salah satu komponen penting sebagai sumber tenaga penggerak, penyimpanan energi, dan pemasok energi ke seluruh komponen - komponen pendukung pada kendaraan listrik. Baterai adalah satu atau lebih sel elektrokimia yang terhubung secara elektrik yang memiliki terminal / kontak untuk memasok energi listrik. Baterai menghasilkan energi listrik melalui proses reaksi kimia. Terdapat 2 jenis baterai berdasarkan pada proses kimia, yaitu:

- (1) *Primary battery* adalah baterai dengan satu sel atau kumpulan dari beberapa sel yang dapat membangkitkan energi listrik yang hanya digunakan sampai habis dan kemudian dibuang. Baterai primer dirakit dalam keadaan terisi daya, pelepasan adalah proses utama selama operasi pada baterai jenis ini (Winter & Brodd, 2004).
- (2) *Secondary battery* adalah baterai dengan satu sel atau kumpulan dari beberapa sel yang dapat membangkitkan energi listrik, di mana energi listrik dapat dikembalikan ke kondisi bermuatan aslinya setelah energi listrik pada baterai habis dengan arus listrik yang mengalir ke arah yang berlawanan. Istilah lain untuk baterai jenis ini adalah baterai isi ulang. Karena baterai sekunder biasanya dirakit dalam kondisi kosong, baterai tersebut harus diisi terlebih dahulu sebelum dapat digunakan (Winter & Brodd, 2004).

Pada saat ini *secondary battery* banyak digunakan pada kendaraan listrik, *secondary battery* yang paling umum digunakan adalah *lithium-ion*. Sebagian besar EV saat ini, terutama mobil, menggunakan baterai Li-ion untuk tenaga penggerak. Baterai Li-ion banyak digunakan dikarenakan memiliki beberapa keunggulan, seperti siklus hidup yang panjang, kepadatan daya yang tinggi, dan sifat *self-discharge* rendah. Ada beberapa hal yang menjadi kendala pada baterai Li-ion ini seperti ketersediaan bahan mentah, masalah keamanan, dan kapasitas penyimpanan energi yang terbatas (Nitta et al., 2015). Melihat dari keadaan itu para pengembang telah meneliti beberapa alternatif jenis baterai lain, yaitu: Baterai *Lithium-air*, baterai *lithium-sulfur*, *all-solid-state battery*. Energi pada baterai dapat dinyatakan dalam kepadatan energi yang diukur dalam Wh/kg atau dalam kepadatan energi yang diukur dalam Wh/L, masing-masing juga disebut kepadatan energi gravimetri dan volumetrik. Kepadatan energi atau densitas energi baterai dapat diubah oleh desain sel. Kapasitas

spesifik baterai (mAh/g), bergantung pada jenis bahan aktif yang digunakan. Nilai teoritik kapasitas spesifik dapat dihitung, walaupun nilai sebenarnya akan berbeda. Mengacu pada nilai kapasitas spesifik teoritik, maka kuantitas kapasitas baterai akan bergantung pada banyak bahan aktif yang digunakan. Lapisan tebal bahan elektroda memberikan energi tinggi karena bertambahnya jumlah bahan aktif, tetapi ini juga meningkatkan panjang difusi ion-ion dalam bahan yang pada gilirannya menurunkan daya. Sebaliknya, lapisan elektroda yang lebih tipis memberikan jalur difusi yang pendek dan oleh karena itu daya yang lebih tinggi, tetapi mengandung bahan yang kurang aktif dan oleh karena itu kandungan energinya diturunkan. Dengan demikian, peningkatan satu sifat sering kali mengorbankan properti lainnya. Kepadatan energi menyiratkan berapa banyak energi yang dapat ditampung baterai, baterai dengan kerapatan energi lebih tinggi akan lebih ringan daripada baterai berkapasitas serupa dengan kerapatan energi lebih rendah (Nordh, 2013).

### Metodologi

Literatur review ini disajikan menggunakan metode Systematic literature review (SLR) atau tinjauan pustaka sistematis. Dalam hal ini dilakukan tindakan mengidentifikasi, menilai, dan menginterpretasi seluruh temuan-temuan berkaitan dengan topik bahasan dari berbagai sumber (Wahono, 2007). *Systematic review* merupakan sebuah istilah yang digunakan untuk mengacu pada metodologi penelitian tertentu, pengembangan yang dilakukan untuk mencari, mengumpulkan dan kemudian mengevaluasi penelitian yang terkait pada fokus topik tertentu (Lusiana & Suryani, 2014). Tahapan dari metode SLR (*Systematic, Literature, Review*) dijabarkan menjadi 3 tahap sebagai berikut:

#### 1. Perancangan (*Planning*)

Pada pembahasan studi literatur ini mengacu pada rumusan masalah yang telah dijelaskan di pendahuluan, data yang dipakai pada penelitian ini merupakan data sekunder, data sekunder dapat diperoleh melalui studi pustaka, artikel ilmiah terkait sehingga tidak harus turun langsung ke lapangan untuk mengambil data. Rumusan masalah akan dijabarkan menggunakan pertanyaan penelitian (*research question*) sebagai dasar dalam menyusun studi literatur pada tahap perancangan sebagai berikut:

RQ1: Apakah ada energi lain yang dapat menggantikan energi berbahan minyak?

RQ1: Bagaimana performa baterai saat ini?

## 2. Pelaksanaan (*Conducting*)

Pada tahap kedua yaitu pelaksanaan (*Conducting*), penerapan metode SLR (*Systematic, Literature, Review*) dapat membantu mencari sumber. Pada tahap pencarian sumber referensi atau literatur yang relevan menggunakan kata kunci (*keyword*), pencarian pada jurnal atau literatur yang menggunakan bahasa Inggris untuk pencarian artikel dan jurnal internasional, sedangkan yang menggunakan bahasa Indonesia untuk pencarian artikel dan jurnal nasional. Selain itu terdapat parameter pada tahap pelaksanaan yaitu penilaian kualitas (*Quality Assessment*) dari pertanyaan penelitian (*Research Question*) yang akan dijabarkan sebagai berikut :

- QA1: Apakah rentang jurnal yang dipublikasi pada tahun 1996-2020 ?  
 QA2: Apakah literatur jurnal ini menjawab dari RQ1?  
 QA3: Apakah literatur jurnal ini menjawab pertanyaan dari RQ2?

## 3. Pelaporan (*Reporting*)

Tahap pelaporan (*reporting*) adalah tahap akhir pada metode SLR (*Systematic, Literature, Review*) dimana tulisan atau analisis dari hasil yang telah dicari akan dibuat dalam bentuk tulisan yang kemudian dilanjutkan dalam pembahasan literatur review ini (Triandini et al., 2019).

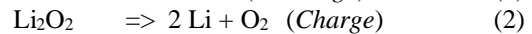
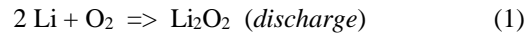
### Hasil

Pada literatur review: “Analisa Performa Baterai *Lithium-air*, *Lithium-sulfur*, *All-Solid-State Battery*, *Lithium-ion* Pada Kendaraan Listrik” terdapat dua jurnal yang dipublikasikan pada tahun 1996, jurnal yang dipublikasikan pada tahun 2020 sebanyak empat jurnal, dan sisa jurnal yang lain dipublikasikan antara tahun 1996 sampai dengan tahun 2020.

### *Lithium-air*

Ada beberapa jenis baterai *Lithium-air* yaitu *non-aqueous* dan *aqueous*. Tahun 1996, Abraham dan Jiang untuk pertama kalinya baterai *Li-O<sub>2</sub> non-aqueous* menggunakan elektrolit organik sebagai pengganti elektrolit berair. Terdiri dari membran elektrolit polimer organik konduktif  $\text{Li}^+$ , anoda logam Li, dan elektroda komposit karbon. Pada (*open circuit voltage*) OCV tetap konstan selama pelepasan (*discharge*) pertama sekitar 2,85 V selama 60% dan kemudian turun menjadi sekitar 2,75 V pada akhir *discharge*. *Recharge* kapasitas pelepasan dalam sel Li / oksigen dapat dipulihkan sepenuhnya dengan mengisi daya dengan tegangan

4 V. Sel-sel pada baterai menunjukkan energi spesifik antara 250-350 Wh/kg berdasarkan reaksi kimia dibawah ini:



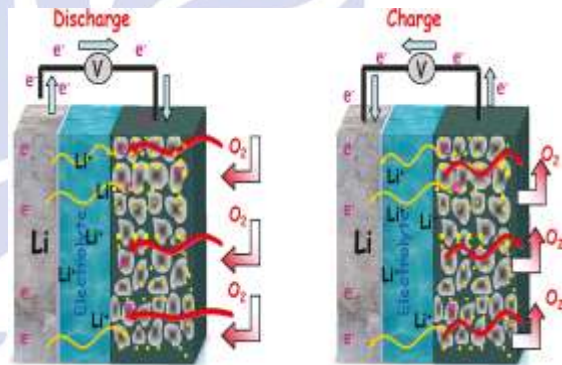
Keterangan :

Li : *Lithium*

O<sub>2</sub> : Oksigen

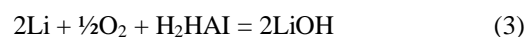
Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : *Lithium peroxide*

Sel dapat diisi ulang dengan efisiensi coulomb yang baik menggunakan elektroda karbon yang dikatalisasi oleh phthalocyanine kobalt, meskipun terdapat kelebihan potensial yang besar antara pengosongan dan pengisian daya serta siklus hidup yang sangat singkat (Abraham & Jiang, 1996). Pada sebuah penelitian yang menggunakan perhitungan DFT dari spektrum satu elektron menunjukkan Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub> memiliki celah atau gap pita yang cukup besar. Secara garis besar gap energi dihitung menjadi 2.85 eV yang tidak tergantung pada kerapatan elektron. Ini berarti bahwa dari sudut pandang termodinamika, sebagian besar gap Li dapat dibuat pada potensial 2.85 V (Hummelshøj et al., 2010). Gambar 1 adalah proses sistematis pada baterai *Li-O<sub>2</sub> non-aqueous*:



Gambar 1: Proses sistematis pada baterai *Li-O<sub>2</sub> non-aqueous*. (Girishkumar et al., 2010)

Pada *Li-O<sub>2</sub> aqueous* terdiri dari anoda logam litium, katoda berpori, dan elektrolit berair yang dipisahkan dari anoda litium oleh elektrolit padat penghantar ion litium yang tahan air. Kepadatan energi teoritis baterai lithium air berair berdasarkan reaksi:



Keterangan:

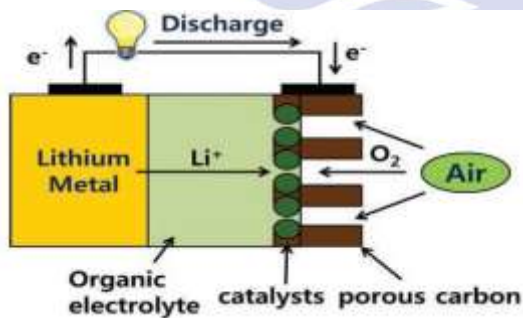
H<sub>2</sub>HAI : Hidrogen peroksida

LiOH : *Lithium hydroxide*

*Li-Air aqueous* dapat mencapai energi spesifik spektakuler lebih dari 800 Wh / kg (Visco et al., 2014).



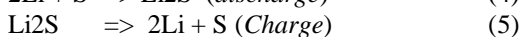
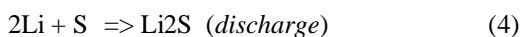
Baterai Li-air berbasis (*gel polymer electrolyte*) GPE menunjukkan perilaku pengisian yang lebih baik. Baterai Li-air berbasis LiI-GPE efisiensi coulombik dapat mencapai sekitar 100%, berkat sinergi aditif LiI dan elektrolit gel di mana LiI dapat membuat produk pelepasan terurai dengan *overpotensial* rendah dan GPE dapat bertindak sebagai pelindung logam Li pada saat yang sama. Kinerja baterai Li-air berbasis LiI-GPE atau GPE jauh lebih baik daripada baterai Li-air yang menggunakan elektrolit cair, yang dapat dikaitkan dengan perlindungan efektif dari struktur kompak elektrolit gel. Baterai Li-air berbasis LiI-GPE menunjukkan kurva tegangan yang hampir dapat direproduksi tanpa kapasitas memudar selama 400 siklus, kecuali untuk peningkatan kecil dalam polarisasi tegangan selama 50 siklus awal. tegangan yang diperoleh di terminal pelepasan baterai Li-air LiI-GPE lebih tinggi dari 2,3 V (Guo et al., 2017). Pada penelitian katoda yang direkayasa untuk menghasilkan kinerja yang signifikan saat beroperasi di udara. Katoda DC elektrolit tertanam, daya puncaknya adalah 4380 W kg<sup>-1</sup> karbon dan energi spesifik pada laju pelepasan C / 3 adalah karbon 1200 Wh/kg<sup>1</sup> saat beroperasi pada udara yang mengalir (Adams et al., 2013).). Yang menjadi perhatian pada *lithium-air* ini adalah kemurnian udara. Kemurnian udara menjadi tantangan, karena udara yang ada tidak cukup bersih sehingga perlu disaring. Reaksi kimia yang terjadi didalam baterai akan menghasilkan dendrit yang menjadi penghalang pergerakan elektron (Bruce et al., 2011). Gambar 2 adalah proses sistematis pada baterai Li-O<sub>2</sub> aqueous :



Gambar 2: Proses sistematis pada baterai Li-O<sub>2</sub> aqueous. (Lee et al., 2011)

### Lithium-sulfur

Baterai litium-sulfur memberikan pilihan yang menjanjikan yang secara teoritis dapat, dengan mempertimbangkan biaya dan energi yang spesifik. Secara teoritis *lithium-sulfur* memiliki kepadatan energi 2500 Wh/kg<sup>-1</sup> (Chen & Shaw, 2014) berdasarkan reaksi kimia dibawah ini:

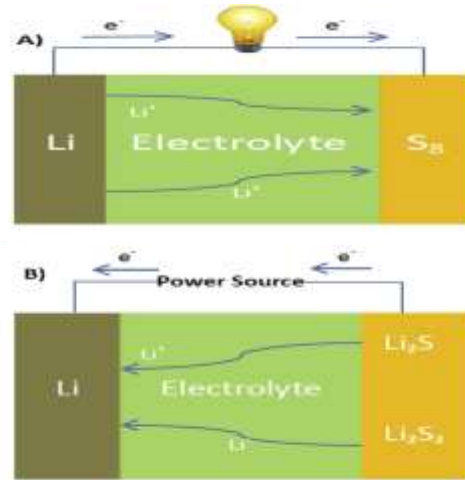


Keterangan:

S : Sulfur

Li<sub>2</sub>S : *Lithium sulfide*

Gambar 3 adalah proses sistematis pada baterai *lithium-sulfur*:



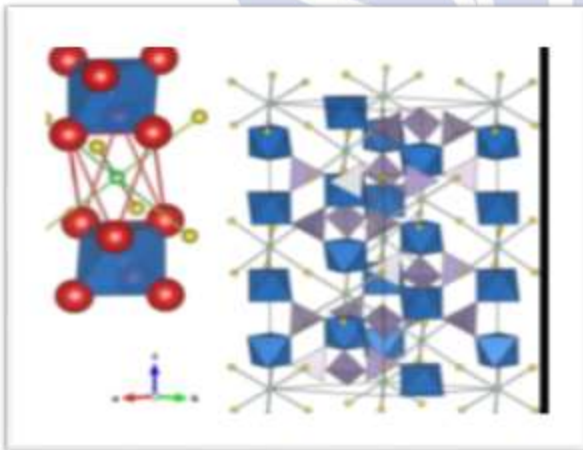
Gambar 3: Proses sistematis pada baterai *lithium-sulfur* a) Proses *discharge* b) Proses *Charge*. (Chen & Shaw, 2014)

Pada sebuah penelitian yang menggunakan teknik pengukuran *cyclic voltammetry* (CV) dan *galvanostatik* untuk mengamati proses pengisian dan pelepasan, ditemukan peningkatan jumlah siklus mengakibatkan peningkatan perbedaan potensial antara pengisian dan pelepasan. Perbedaan rata-rata ini disebabkan oleh pembentukan polisulfida. Kapasitas debit setelah 30 siklus kira-kira 200 mAh / g sulfur. Kehilangan kapasitas setelah 30 siklus adalah sekitar 66%. Pelepasan baterai Li-S pasti menyebabkan pembentukan polisulfida Li<sub>2</sub>S<sub>2</sub> dan Li<sub>2</sub>S yang tidak dapat larut (Jura ka et al., 2015). Tegangan tipikal dari sel Li-S yang diperoleh pada arus konstan. Pelepasan berpusat pada 2,35 V (Nazar et al., 2014). Pada penelitian *lithium-sulfur* dengan penambahan *carbon nano-fiber* (CNF) pada elektroda belerang. Elektroda belerang dengan serat nano karbon masing-masing menggunakan PEO dan PVdF sebagai pengikat. Untuk PEO sebagai pengikat menunjukkan sifat siklus hidup yang lebih stabil hingga siklus ke-60. Untuk PVdF sebagai pengikat dengan dengan elektroda menunjukkan kapasitas pelepasan awal yang lebih tinggi tetapi kapasitas pelepasan menurun pada setiap siklusnya (Choi et al., 2008). Pada penelitian yang menyelidiki hubungan antara sifat bahan dan kinerja baterai diperoleh hasil bahwa luas permukaan spesifik dari bahan konduktif memiliki pengaruh yang lebih besar pada kinerja baterai dibandingkan dengan konduktivitas elektroniknya (Nagata & Chikusa, 2014).

Baterai *lithium-sulfur* (Li-S) telah lama menjadi pusat penelitian karena kapasitas spesifik teoretisnya yang tinggi, biaya rendah, dan tidak beracun. Namun pelarutan katoda belerang dan polisulfida menyebabkan efek *shuttle* yang secara signifikan dan pertumbuhan dendrit yang tidak terkendali dapat mengurangi siklus hidup (Hu et al., 2020).

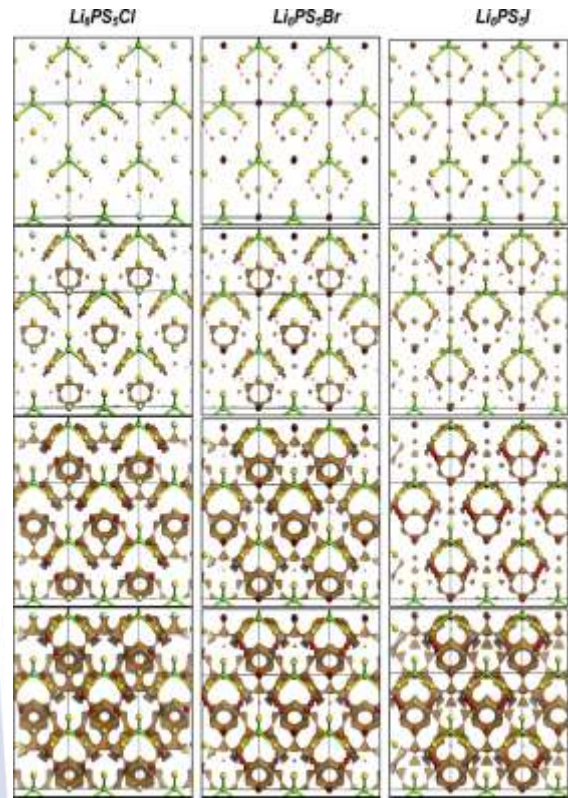
**All-solid-state batteries**

Ada beberapa jenis baterai *All-solid-state* antara lain NASICON, garnet, perovskite, LISICON, argyrodite, dan lain-lain. Pada jenis NASICON terdapat tiga tipe yaitu LZP, LTP, LGP. Konduktivitas LZP ditingkatkan atau disubstitusikan dengan Al (aluminium) menjadi LAZP dengan peluang elektrokimia diperkirakan 2,20-4,14 V vs logam Li. Konduktivitas LTP ditingkatkan atau disubstitusikan dengan Al (aluminium) menjadi LATP, dengan peluang elektrokimia LATP terhadap logam Li adalah 2,17V - 4,21 V, Konduktivitas LGP ditingkatkan atau disubstitusikan dengan Al (aluminium) menjadi LAGP, dengan peluang elektrokimia LAGP adalah 2,7V - 4,21V (Hou et al., 2020). Gambar 4 adalah elektrolit tipe NASICON:



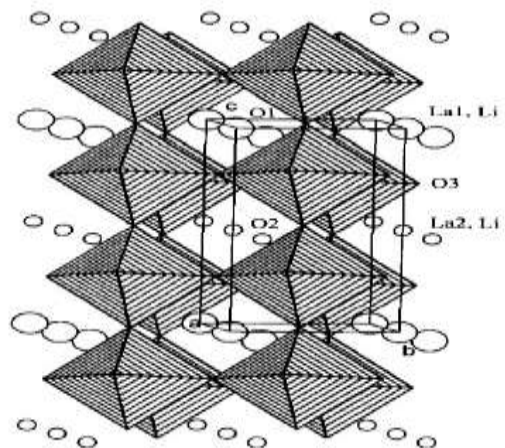
Gambar 4: Elektrolit tipe NASICON (Hou et al., 2020)

Pada penelitian argyrodite ini menggunakan tiga sampel Li<sub>6</sub>PS<sub>5</sub>Cl, Li<sub>6</sub>PS<sub>5</sub>Br, Li<sub>6</sub>PS<sub>5</sub>-I. Sampel memiliki konduktivitas ionik 3.3 x 10<sup>-5</sup> S/cm, 3.2 x 10<sup>-5</sup> S/cm, dan 2.2 x 10<sup>-4</sup> S/cm dengan energi aktif 0.38, 0.32, dan 0.26 eV. Konduktivitas ionik senyawa kristal akhir adalah 1.9 x 10<sup>-3</sup> S/cm, 6.8 10<sup>-3</sup> S/cm, and 4.6 10<sup>-7</sup> S/cm (Rao & Adams, 2011). Target penelitian *all-solid-state Batteries* energi spesifik 500Whkg<sup>-1</sup> (Randau et al.,2020). Gambar 5 adalah jalur perpindahan senyawa dari argyrodite (Li<sub>6</sub>PS<sub>5</sub>Cl, Li<sub>6</sub>PS<sub>5</sub>Br, Li<sub>6</sub>PS<sub>5</sub>-I):



Gambar 5: Jalur perpindahan senyawa dari argyrodite (Li<sub>6</sub>PS<sub>5</sub>Cl, Li<sub>6</sub>PS<sub>5</sub>Br, Li<sub>6</sub>PS<sub>5</sub>-I) (Rao & Adams, 2011).

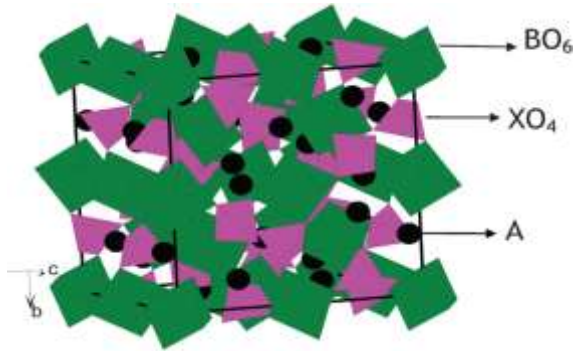
Pada penelitian perovskite menunjukkan konduktivitas ionik yang sangat tinggi pada suhu kamar dan peluang elektrokimia lebih besar dari 4V. Tetapi pilihan elektroda sangat terbatas karena logam Li atau elektroda pengganti yang memiliki potensi katodik lebih dari 2,8V akan bereaksi dengan bahan-bahan ini dalam kondisi hubung singkat (Bohnke et al., 1996). Gambar 6 adalah struktur dari senyawa perovskite:



Gambar 6: struktur dari senyawa perovskite (Bohnke et al., 1996)

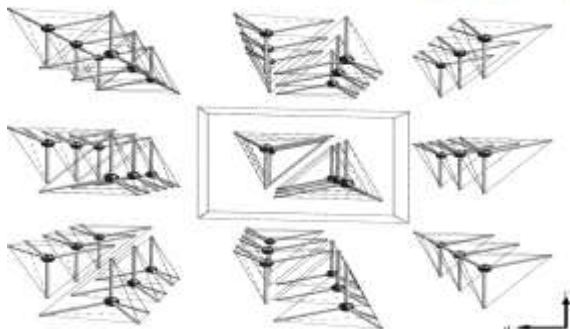


Struktur garnet dapat menampung minimal tiga Li-ion dan maksimal tujuh Li-on. Li garnet berbasis Zr dan Ta stabil terhadap reaksi kimia dan menunjukkan stabilitas elektrokimia hingga 6V per Li pada suhu kamar. Seperti konduktor ion lainnya Li yang kaya akan garnet mengalami pertukaran proton yang cepat dalam air, asam encer, dan larutan LiCl/ LiOH berair (Thangadurai et al., 2014). Gambar 7 adalah struktur dari senyawa garnet:



Gambar 7: struktur dari senyawa garnet. (Thangadurai et al., 2014).

Senyawa *thio-LISICON* baru berdasarkan lithium silikon sulfida ditemukan ada dan memiliki konduktivitas ionik tinggi  $6,4 \times 10^{-4} \text{ Scm}^{-1}$  pada suhu kamar untuk  $\text{Li}_{3.4}\text{Si}_{0.4}\text{P}_{0.6}\text{S}_4$ . Bahan tersebut menunjukkan stabilitas elektrokimia yang tinggi dan tidak ada reaksi dengan logam lithium. Berdasarkan  $\text{Li}_4\text{Si}_4$  stoikiometri, kekosongan litium dan ion litium interstisial diperkenalkan oleh substitusi aliovalen dari  $\text{Si}^{4+} = \text{Li}^{++} \text{Al}^{3+}$  dan  $\text{Si}^{4++} \text{Li}^{+} = \text{P}^{5+}$ ; masing-masing. Konduktivitas meningkat di kedua substitusi. Sebuah sel lithium solidstate menggunakan  $\text{In} / \text{Li}_{34.4}\text{Si}_{0.4}\text{P}_{0.6}\text{S}_4 / \text{LiCoO}_2$  beroperasi pada tegangan tinggi (4,5 V). Sel diisi dan dilepaskan pada arus  $> 127 \mu\text{Acm}^{-2}$  (Murayama et al., 2002). Gambar 8 adalah struktur dari senyawa thio-LISICON:

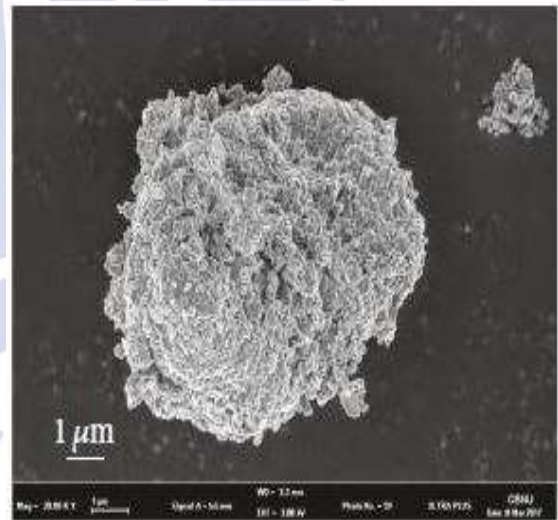


Gambar 8: Struktur dari *senyawa thio-LISICON* (Murayama et al., 2002).

Di masa depan, semua baterai *all-solid-state* akan menjadi baterai yang sangat aman dan efisien. Hal ini karena elektrolit padat memiliki konduktivitas ionik yang besar, dan juga memiliki titik leleh yang tinggi. Penggunaan baterai solid state di mobil listrik menghilangkan semua elemen pendingin, yang membuat baterai lebih ringan (Kartini & Theresa Genardy, 2020).

### Lithium-ion

Baterai *lithium-ion* terbagi menjadi beberapa jenis bergantung pada jenis komposisi bahannya. Hal tersebut berpengaruh terhadap kemampuan setiap jenis baterai *lithium-ion*. Beberapa jenis baterai lithium yaitu NCA, NCM, LFP, dan lain-lain. Pada penelitian NCA (*Lithium nickel cobalt aluminum oxide*) yang dibuat dengan reaksi hidrotermal, dan sifat elektrokimianya ditingkatkan dengan doping logam Ti menunjukkan kapasitas *discharge* terbaik  $179,6 \text{ mAh/g}^{-1}$  setelah siklus pertama dan efisiensi coulombik awal 88,6% (Wan et al., 2018). Gambar 9 adalah partikel NCA dengan logam TI:

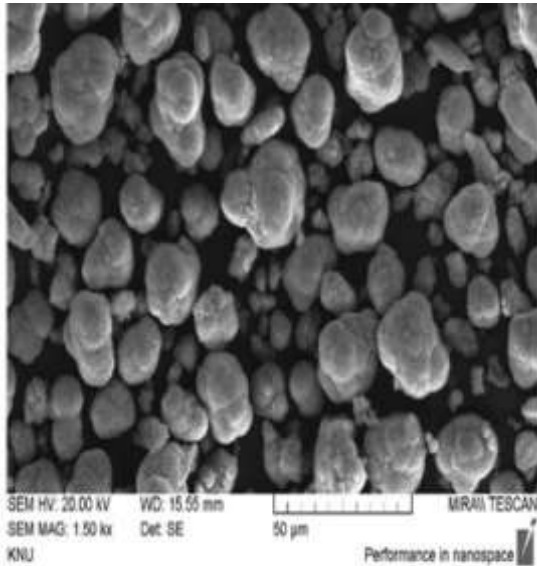


Gambar 9: Partikel NCA dengan logam TI (Wan et al., 2018).

Pada baterai NCA energi kepadatan yang ingin dicapai saat ini  $742 \text{ Wh/kg}^{-1}$  (Chikkannanavar et al., 2014).

Pada penelitian NMC (*Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide*) Hasil percobaan elektrokimia menunjukkan bahwa bahan katoda  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$  berlapis yang dikalsinasi pada suhu  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  selama 16 jam memiliki kapasitas pelepasan awal

tertinggi 193,7 mAhg<sup>-1</sup> dalam rentang tegangan dari 3,0 hingga 4,3 V dengan kemampuan laju yang baik (Vu & Lee, 2016). Gambar 10 adalah partikel NMC:

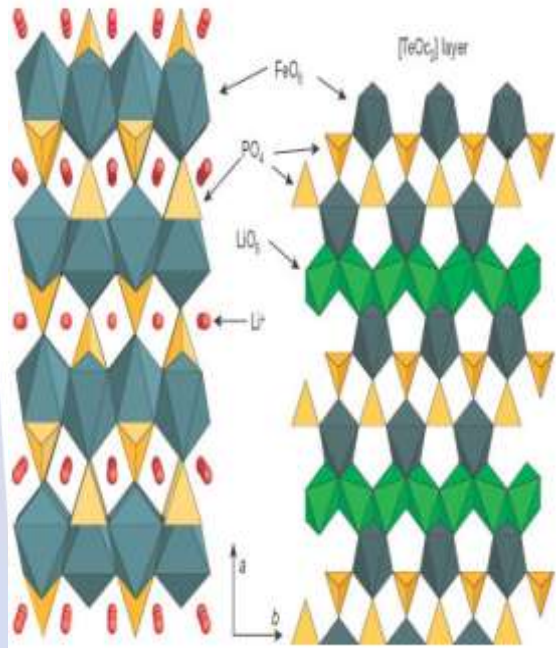


Gambar 10: Partikel NMC (Vu & Lee, 2016).

Pada baterai NMC energi kepadatan yang ingin dicapai saat ini 588 Wh/kg<sup>-1</sup> (Chikkannanavar et al., 2014).

Pada penelitian LFP (*Lithium Iron Phosphate*), ditemukan bahwa sejumlah kecil karbon internal (IC), dapat meningkatkan konduktivitas ionik GC / IC / LFP. Performa elektrokimia GC / IC / LFP, seperti stabilitas dan kemampuan pemulihan kapasitas, lebih baik daripada LFP biasa yang dibuat menggunakan PA, meskipun dengan kandungan bahan aktif yang tinggi dalam elektroda kerja (85%). Terutama, GC / IC / LFP yang telah disiapkan

menunjukkan kapasitas spesifik sangat tinggi 192 mA hg<sup>-1</sup> pada 0,1 C, yang melebihi kapasitas teoritis LFP, dengan kinerja laju yang luar biasa sebesar 140 mAhg<sup>-1</sup> pada 10 C. Efisiensi energi GC / IC / LFP mencapai hampir 96% pada 0,1 C (Zhao et al., 2017). Gambar 11 adalah partikel LFP:



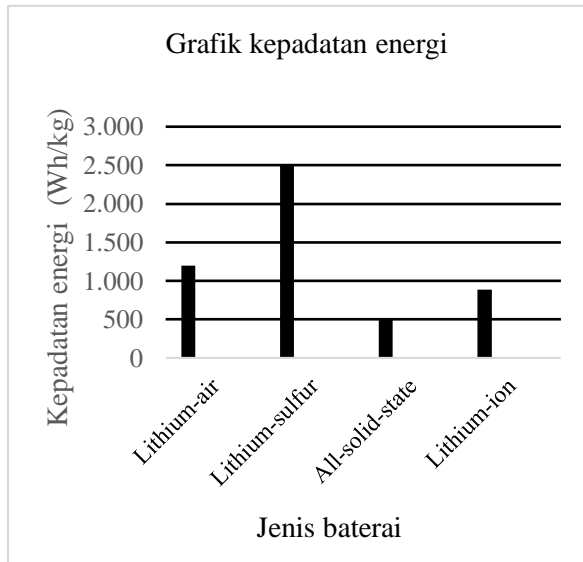
Gambar 11: Partikel LFP C (Zhao et al., 2017).

Pada baterai LFP energi kepadatan yang ingin dicapai saat ini >890 Wh/kg<sup>-1</sup> (Chikkannanavar et al., 2014).

Tabel 1. Analisa performa spesifikasi baterai

Baterai	Kepadatan energi (Wh/kg)	Tegangan per sel (V)	Discharge (V)	Charging (V)	Siklus
<i>Lithium-air</i>	250-1.200	2,85	2,3-2,85	4	50 (dalam lab)
<i>Lithium-sulfur</i>	2.500	2,1-2,4	2,35	3,8	60 (dalam lab)
All-solid-state	500	2,17	2,17-2,8	3,6	250 (dalam lab)
<i>Lithium-ion</i>	890	3	3	4,3	500-2000

Berdasarkan tabel 1 setiap jenis baterai memiliki spesifikasi yang berbeda.

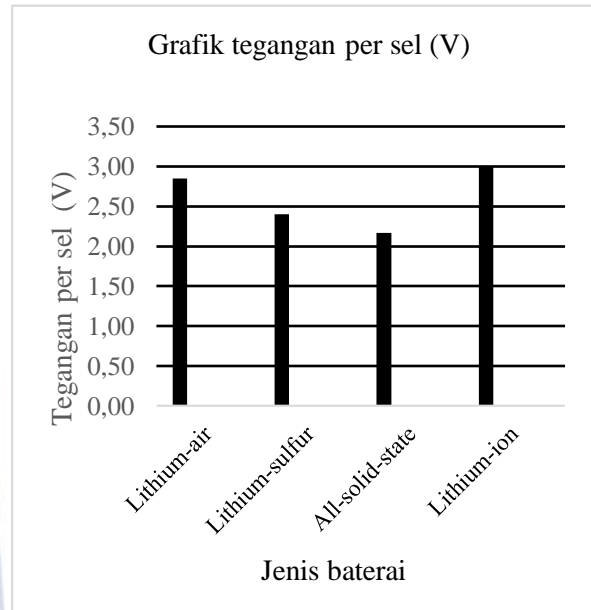


Gambar 12: Grafik kepadatan energi baterai

Baterai *lithium-air* memiliki kepadatan energi sebesar 250 Wh/kg sampai dengan 1.200Wh/kg. Baterai *lithium-sulfur* memiliki energi spesifik paling tinggi sebesar 2.500Wh/kg. Pada baterai *All-solid-state* memiliki energi spesifik sebesar 500Wh/kg. Pada baterai *lithium-ion* memiliki energi spesifik sebesar 890Wh/kg. Untuk energi spesifik terbaik pada keempat baterai ini adalah baterai *lithium-sulfur* dikarenakan energi spesifik yang paling besar yaitu 2.500Wh/kg. Kepadatan energi menyiratkan berapa banyak energi yang dapat ditampung baterai, baterai dengan kerapatan energi lebih tinggi akan lebih ringan daripada baterai berkapasitas serupa dengan kerapatan energi lebih rendah. Baterai dengan Kepadatan energi tinggi memiliki waktu pengoperasian baterai yang lebih lama dibandingkan dengan ukuran baterai. Baterai dengan kepadatan energi tinggi dapat menghasilkan jumlah energi yang sama, tetapi dalam footprint yang lebih kecil dibandingkan dengan baterai dengan kepadatan energi yang lebih rendah.

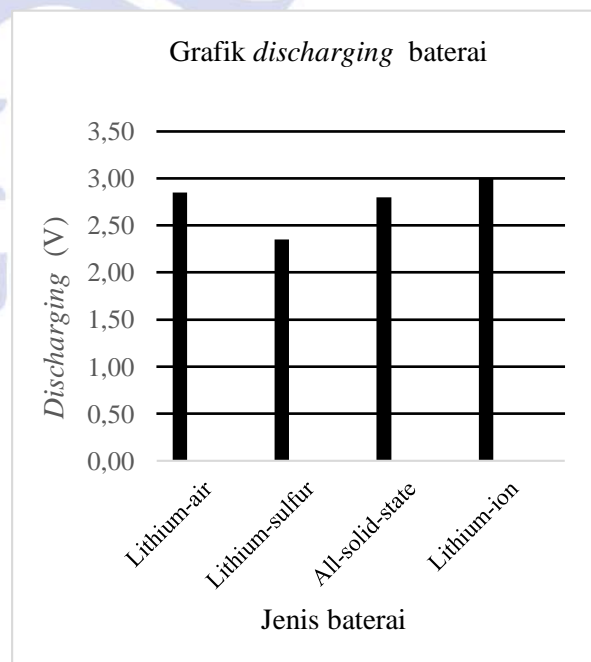
Tegangan per sel adalah tegangan yang dapat dihasilkan pada setiap selnya. Pada baterai *lithium-air* memiliki tegangan per sel sebesar 2,85V . Pada baterai *lithium-sulfur* memiliki tegangan per sel sebesar 2,1V sampai dengan 2,4V. Pada baterai *All-solid-state* memiliki tegangan per sel sebesar 2,17V. Sedangkan pada baterai *lithium-ion* tegangan per sel pada baterai *lithium-ion* sebesar 3V. Untuk tegangan per sel terbaik pada keempat baterai ini adalah baterai *lithium-ion*, dikarenakan

baterai *lithium-ion* memiliki tegangan per sel yang paling besar yaitu 3V.



Gambar 13: Grafik tegangan per sel baterai

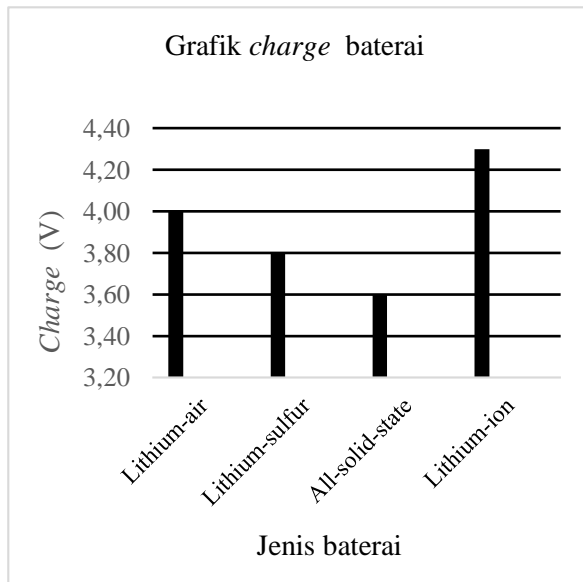
*Discharge* atau pelepasan adalah operasi di mana baterai melepaskan atau memberikan energi listrik pada beban. Dapat dilihat pada gambar 14 grafik *discharge*, baterai *lithium-air* memiliki potensi *discharge* sebesar 2,85V, baterai *lithium-sulfur* memiliki potensi *discharge* sebesar 2,35V, baterai *all-solid-state* memiliki potensi *discharge* sebesar 2,8V, dan pada, baterai *lithium-ion* memiliki potensi *discharge* paling besar yaitu sebesar 3V.



Gambar 14: Grafik discharge baterai



*Charge* atau pengisian adalah operasi di mana baterai dikembalikan ke kondisi terisi kembali. Dapat dilihat pada gambar grafik 15 *charge*, *charge* kapasitas pelepasan pada baterai *lithium-air* dapat dipulihkan dengan mengisi daya dengan tegangan 4V. Untuk *charge* kapasitas pelepasan pada baterai *lithium-sulfur* dapat dipulihkan dengan mengisi daya dengan tegangan 3,8V. Pada baterai *all-solid-state charge* kapasitas pelepasan dapat dipulihkan dengan mengisi daya dengan tegangan 3,6V. Pada baterai *lithium-ion charge* kapasitas pelepasan dapat dipulihkan dengan mengisi daya dengan tegangan 4,3V.



Gambar 15: Grafik *charging* baterai

## Simpulan

Untuk kepadatan energi dari keempat baterai tersebut baterai *lithium-sulfur* memiliki kepadatan energi yang tinggi sebesar 2.500Wh/kg. Kepadatan energi tinggi memiliki waktu pengoperasian baterai yang lebih lama dibandingkan dengan ukuran baterai. Baterai dengan kepadatan energi tinggi dapat menghasilkan jumlah energi yang sama, tetapi dalam footprint yang lebih kecil dibandingkan dengan baterai dengan kepadatan energi yang lebih rendah. Pada tegangan per sel lithium-on memiliki tegangan per sel yang tinggi sebesar 3V. Untuk *discharge* baterai, baterai *lithium-ion* memiliki potensi paling tinggi yaitu 3V. Hal ini baik untuk memberikan energi ke beban. Pada *charge* baterai, baterai *lithium-ion* memiliki potensi besar yaitu 4,3V, hal ini baik unruk pengisian atau pengembalian ke kondisi terisi dengan cepat. Dapat disimpulkan bahwa baterai dapat digunakan sebagai

energi pengganti dari bahan bakar minyak, dikarenakan banyak produsen otomotif yang mengembangkan kendaraan bahan bakar minyak menjadi kendaran listrik. Setiap baterai memiliki spesifikasi yang berbeda. Baterai *lithium-air* dan baterai *lithium-sulfur* menawarkan kerapatan energi yang besar dibandingkan dengan baterai *all-solid-state* dan baterai Li-ion, hal ini memberikan keuntungan dibandingkan dengan baterai Li-ion. Pada baterai *lithium-sulfur* memiliki kepadatan energi sebesar 2.500Wh/kg dan sudah melebihi kepadatan energi baterai Li-ion. Baterai *lithium-sulfur* ini banyak mengalami perkembangan, hal ini memungkinkan baterai *lithium-sulfur* cepat untuk diproduksi secara masal daripada baterai *lithium-air* dan baterai *all-solid-state* dikarenakan banyak tantangan pada baterai lithium-sulur sudah terpecahkan.

## Saran

Ada banyak tantangan yang harus dipecahkan. Pengembangan masa depan harus menekankan pada pengembangan bahan pendukung yang efisien tinggi, sehingga meningkatkan kualitas pada baterai tersebut.

## Daftar Pustaka

- Abraham, K. M., & Jiang, Z. (1996). *Electrochemical science and technology a polymer electrolyte-based rechargeable lithium / oxygen battery*. *Journal of The Electrochemical Society*, 143(1), pp 1–5.
- Adams, J., Karulkar, M., & Anandan, V. (2013). *Evaluation and electrochemical analyses of cathodes for lithium-air batteries*. *Journal of power sources*, 239, pp 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.03.140>
- Bohnke, O., Bohnke, C., & Fourquet, J. L. (1996). *Mechanism of ionic conduction and electrochemical intercalation of lithium into the perovskite lanthanum lithium titanate*. *Solid State Ionics*, 91(1–2), pp 21–31. [https://doi.org/10.1016/s0167-2738\(96\)00434-1](https://doi.org/10.1016/s0167-2738(96)00434-1)
- Bruce, P. G., Hardwick, L. J., & Abraham, K. M. (2011). *Lithium-air and lithium-sulfur batteries*. *MRS Bulletin*, 36(7), pp 506–512. <https://doi.org/10.1557/mrs.2011.157>
- Chen, L., & Shaw, L. L. (2014). Recent advances in *lithium-sulfur* batteries. *Journal of Power Sources*, 267, pp 770–783. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.05.1>

- Chikkannanavar, S. B., Bernardi, D. M., & Liu, L. (2014). *A review of blended cathode materials for use in li-ion batteries*. *Journal of Power Sources*, 248, pp 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.09.052>
- Choi, Y. J., Kim, K. W., Ahn, H. J., & Ahn, J. H. (2008). *Improvement of cycle property of sulfur electrode for lithium/sulfur battery*. *Journal of Alloys and Compounds*, 449(1–2), pp 313–316. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.02.098>
- Girishkumar, G., Mccloskey, B., Luntz, A. C., Swanson, S., & Wilcke, W. (2010). *Lithium - air battery: Promise and challenges*. pp 2193–2203. <https://doi.org/10.1021/jz1005384>
- Guo, Z., Li, C., Liu, J., Wang, Y., & Xia, Y. (2017). *A long-life lithium-air battery in ambient air with a polymer electrolyte containing a redox mediator*. *Angewandte Chemie*, 129(26), pp 7613–7617. <https://doi.org/10.1002/ange.201701290>
- Hou, M., Liang, F., Chen, K., Dai, Y., & Xue, D. (2020). *Challenges and perspectives of NASICON-type solid electrolytes for all-solid-state lithium batteries*. *Nanotechnology*, 31(13). <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab5be7>
- Hu, Y., Chen, W., Lei, T., Jiao, Y., Huang, J., Hu, A., Gong, C., Yan, C., Wang, X., & Xiong, J. (2020). *Strategies toward high-loading lithium-sulfur battery*. *Advanced Energy Materials*, 10(17), pp 1–19. <https://doi.org/10.1002/aenm.202000082>
- Hummelshøj, J. S., Blomqvist, J., Datta, S., Vegge, T., Rossmeisl, J., Thygesen, K. S., Luntz, A. C., Jacobsen, K. W., & Nørskov, J. K. (2010). *Elementary oxygen electrode reactions in the aprotic li-air battery*. *Journal of Chemical Physics*, 132(7). <https://doi.org/10.1063/1.3298994>
- Jura ka, M., Vondrak, J., Sedla ikova, M., & Gottwald, T. (2015). *Lithium sulphur batteries*. *ECS Transactions*, 70(1), pp 283–288. <https://doi.org/10.1149/07001.0283ecst>
- Kartini, E., & Theresa Genardy, C. (2020). *The future of all solid state battery*. *IOP Conference Series: Materials science and engineering*, 924(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/924/1/012038>
- Lee, J. S., Kim, S. T., Cao, R., Choi, N. S., Liu, M., Lee, K. T., & Cho, J. (2011). *Metal-air batteries with high energy density: Li-air versus Zn-air*. *Advanced Energy Materials*, 1(1), pp 34–50. <https://doi.org/10.1002/aenm.201000010>
- Liu, T., Vivek, J. P., Zhao, E. W., Lei, J., Garcia-Araez, N., & Grey, C. P. (2020). *Current challenges and routes forward for nonaqueous lithium-air batteries*. *Chemical Reviews*, 120(14), pp 6558–6625. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00545>
- Lusiana, & Suryani, M. (2014). *Metode SLR untuk mengidentifikasi isu-isu dalam software engineering*. *SATIN (Sains Dan Teknologi Informasi)*, 3(1), pp 1–11. <http://jurnal.stmik-amik-riau.ac.id/index.php/satin/article/view/347>
- Murayama, M., Kanno, R., Irie, M., Ito, S., Hata, T., Sonoyama, N., & Kawamoto, Y. (2002). *Synthesis of new lithium ionic conductor thio-LISICON - Lithium silicon sulfides system*. *Journal of Solid State Chemistry*, 168(1), pp 140–148. <https://doi.org/10.1006/jssc.2002.9701>
- Nagata, H., & Chikusa, Y. (2014). *A lithium sulfur battery with high power density*. *Journal of Power Sources*, 264, pp 206–210. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.106>
- Nazar, L. F., Cuisinier, M., & Pang, Q. (2014). *Lithium-sulfur batteries*. *MRS Bulletin*, 39(5), pp 436–442. <https://doi.org/10.1557/mrs.2014.86>
- Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. (2015). *Li-ion battery materials: Present and future*. *Materials Today*, 18(5), pp 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>
- Nordh, T. (2013). *Li4Ti5O12 as an anode material for Li ion batteries in situ XRD and XPS studies*. *Uppsala Universitet Thesis*, pp 1–40.
- Randau, S., Weber, D. A., Kötz, O., Koerver, R., Braun, P., Weber, A., Ivers-Tiffée, E., Adermann, T., Kulisch, J., Zeier, W. G., Richter, F. H., & Janek, J. (2020). *Benchmarking the performance of all-solid-state lithium batteries*. *Nature Energy*, 5(3), pp 259–270. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0565-1>
- Rao, R. P., & Adams, S. (2011). *Studies of lithium*



*argyrodite solid electrolytes for all-solid-state batteries. Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 208(8), pp 1804–1807.  
<https://doi.org/10.1002/pssa.201001117>

Thangadurai, V., Narayanan, S., & Pinzaru, D. (2014). *Garnet-type solid-state fast Li ion conductors for li batteries: Critical review. Chemical Society Reviews*, 43(13), pp 4714–4727. <https://doi.org/10.1039/c4cs00020j>

Triandini, E., Jayanatha, S., Indrawan, A., Werla Putra, G., & Iswara, B. (2019). Metode *Systematic literature review* untuk identifikasi platform dan metode pengembangan sistem informasi di Indonesia. *Indonesian Journal of Information Systems*, 1(2), 63.  
<https://doi.org/10.24002/ijis.v1i2.1916>

Visco, S. J., Nimon, V. Y., Petrov, A., Pridatko, K., Goncharenko, N., Nimon, E., De Jonghe, L., Volkovich, Y. M., & Bograchev, D. A. (2014). *Aqueous and nonaqueous lithium-air batteries enabled by water-stable lithium metal electrodes. Journal of Solid State Electrochemistry*, 18(5), pp 1443–1456.  
<https://doi.org/10.1007/s10008-014-2427-x>

Vu, D. L., & Lee, J. won. (2016). *Properties of LiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.1</sub>Mn<sub>0.1</sub>O<sub>2</sub> as a high energy cathode material for lithium-ion batteries. Korean Journal of Chemical Engineering*, 33(2), pp 514–526.  
<https://doi.org/10.1007/s11814-015-0154-3>

Wahono, R. S. (2007). *A systematic literature review of software defect prediction: Research trends, datasets, methods and frameworks. Journal of software Engineering*, 1(1), pp 1–16. <https://doi.org/10.3923/jse.2007.1.12>

Wan, D. Y., Fan, Z. Y., Dong, Y. X., Baasanjav, E., Jun, H. B., Jin, B., Jin, E. M., & Jeong, S. M. (2018). *Effect of metal (Mn, Ti) doping on NCA cathode materials for lithium ion batteries. Journal of Nanomaterials*, 2018.  
<https://doi.org/10.1155/2018/8082502>

Winter, M., & Brodd, R. J. (2004). *What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? Chemical Reviews*, 104(10), 4245–4269.  
<https://doi.org/10.1021/cr020730k>

Zhao, Q., Zhang, Y., Meng, Y., Wang, Y., Ou, J., Guo, Y., & Xiao, D. (2017). *Phytic acid derived LiFePO<sub>4</sub> beyond theoretical capacity as high-energy density cathode for lithium ion battery. Nano Energy*, 34(March), pp 408–420.  
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.03.006>