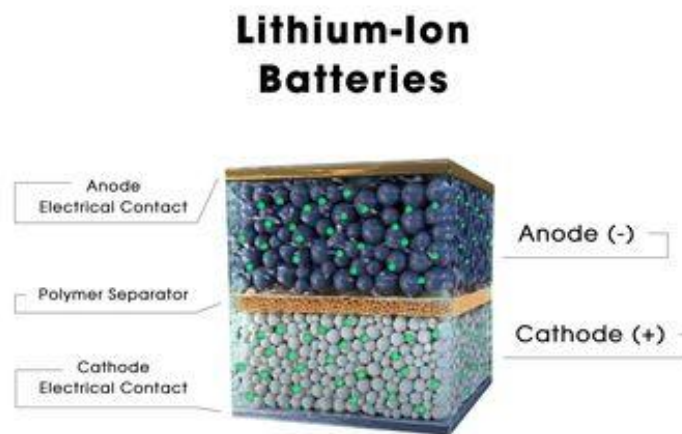


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Baterai

Baterai merupakan salah satu sumber energi listrik yang sangat diandalkan untuk mengoperasikan peralatan elektronik yang bersifat portabel atau dapat dibawa kemana-mana. Berdasarkan kepraktisan tersebut maka dibuat benda yang dapat menyimpan sumber energi listrik dalam waktu tertentu. Ada beberapa jenis baterai yang sering dijumpai dalam kehidupan sehari-hari, yaitu baterai primer dan baterai sekunder. Kedua baterai tersebut memiliki sifat yang sama yaitu mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Baterai sekunder adalah baterai yang dapat diisi ulang (*Rechargeable Battery*) misal baterai telepon genggam. Baterai primer adalah baterai yang bersifat *disposable* atau sekali pakai (Nasution, 2021).



Gambar 2. 1 Bagian pada Baterai *Lithium-Ion*

Gambar 2.1 menunjukkan Baterai *Lithium-Ion* yang pada umumnya memiliki empat komponen utama yaitu elektroda positif (katoda), elektroda negatif (anoda), elektrolit, dan separator.

Anoda adalah elektroda yang bersifat negatif dan katoda adalah elektroda yang bersifat positif. Saat kedua elektroda ini dihubungkan melalui sebuah beban,

arus akan mengalir dari katoda ke anoda. Separator adalah sebuah lapisan yang diletakan di dalam elektrolit. Separator berfungsi untuk mencegah kontak fisik antara anoda dan katoda. Separator tidak terlibat dalam reaksi kimia dalam baterai, akan tetapi separator mempengaruhi kepadatan energi, daya, banyaknya siklus baterai, dan keamanan baterai. Elektrolit adalah sebuah zat yang terdapat di dalam baterai. Zat ini akan bereaksi secara kimia dengan material aktif yang terdapat di anoda atau katoda sehingga dari reaksi kimia tersebut menghasilkan energi listrik (Hermawan P, 2010).

2.2.Parameter baterai

Beberapa parameter penting dalam baterai, antara lain:

2.2.1. Tegangan Baterai

Tegangan terminal saat kondisi operasi dikenal dengan istilah tegangan nominal atau tegangan kerja. Nilai tegangan ini akan ditentukan oleh manufaktur pembuat baterai. Tegangan ini biasanya bernilai 3V, 6V, 12V, 24V dan lain sebagainya (Manimekalai et al., 2013).

2.2.2. Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai dapat dinyatakan dalam *Ampere Hour* (Ah). Jika V merupakan nilai tegangan pada baterai, maka kapasitas penyimpanan energi baterai dapat dinyatakan dalam $Ah \times V = \text{Watt-hour}$. Biasanya kapasitas pada baterai ditentukan oleh nilai C yang diberikan pada baterai. Sedangkan kapasitas baterai yang sebenarnya bergantung pada kondisi operasi seperti beban, suhu dan lain sebagainya (Manimekalai et al., 2013).

2.2.3. Resistansi Internal

Resistansi internal baterai meliputi resistansi ohmik dan resistansi polarisasi. Resistansi ohmik terdiri dari bahan elektroda, elektrolit, resistansi separator, dan resistansi kontak dari setiap bagian baterai. Resistansi polarisasi adalah disebabkan oleh polarisasi dalam reaksi elektrokimia dan polarisasi konsentrasi (Zhang et al., 2014).

Baterai sebenarnya (*real*) memiliki resistansi internal tidak nol (R_i). Pada resistansi ini akan terjadi drop tegangan sebesar $i \cdot R_i$. Dimana i adalah arus keluaran baterai. Semakin besar arus, maka drop tegangan akan semakin besar, sehingga tegangan keluaran akan semakin menurun ($V_o = V_b - i \cdot R_i$). Semakin besar resistansi internal, maka daya keluaran baterai juga semakin kecil (Ahmad Faiz Farizy, 2016).

2.2.4. State of Charge (SOC)

State of Charge adalah perbandingan energi yang tersisa dengan kapasitas energi maksimum pada baterai. Nilai SOC memiliki rentang nilai 0-1, dengan 0 menyatakan baterai dalam keadaan kosong, sedangkan 1 merupakan kondisi baterai dengan keadaan penuh. Nilai State of charge juga bisa dinyatakan dalam bentuk persentase, 0%-100%. Estimasi *State of Charge* adalah salah satu hal yang penting dalam penerapan baterai. Estimasi nilai *state of charge* yang akurat sangat diperlukan untuk menghindari dari kerusakan sistem, mencegah baterai dari keadaan *overcharge* dan *overdischarge* yang dapat menyebabkan kerusakan permanen pada baterai (Elektro, 2018)..

2.2.5. State of Health (SOH)

State of health dapat dijelaskan oleh resistansi internal baterai atau kapasitas actual, untuk aplikasi otomatis yang penting untuk estimasi status daya dan dapat diagnosis penurunan kapasitas. Pada kondisi Kesehatan baterai laju pengisian atau pemakaian suhu sangat bergantung pada kapasitas maksimum. Estimasi SOH sangat bergantung pada pemakaian dan pengisian suhu diagnosis penurunan kapasitas (Maulidina et al., 2021).

2.2.6. Siklus Hidup Baterai (Battery Life Cycle)

Siklus hidup baterai menunjukkan jumlah pengisian dan pengosongan (satu siklus) yang dapat diterima oleh sebuah baterai sebelum baterai tidak efektif lagi dalam menampung muatan listrik, dengan syarat penggunaan baterai yang normal dan sesuai aturan. Setelah melewati *life cycle* baterai, baterai masih bisa digunakan namun kapasitas pada baterai akan semakin berkurang. Apabila suatu baterai memiliki kekurangan 2000 siklus, dengan 1 siklus terdiri dari 1 kali pengisian dan 1 kali pengosongan maka baterai tersebut dapat digunakan 2000 kali pengisian dan 2000 kali pengosongan. Siklus ini akan memiliki nilai yang sama pada data *sheet* baterai dengan catatan baterai digunakan dengan normal sesuai ketentuan (Elektro, 2018).

2.3. Karakteristik Baterai *Lithium- Ion*

Baterai *Lithium-Ion* merupakan salah satu jenis baterai sekunder (*rechargeable battery*) yang dapat diisi ulang dan merupakan baterai yang ramah lingkungan karena tidak mengandung bahan yang berbahaya seperti baterai-baterai yang berkembang lebih dahulu yaitu baterai Ni-Cd dan Ni-MH. Baterai ini memiliki kelebihan dibandingkan baterai sekunder jenis lain, yaitu memiliki

stabilitas penyimpanan energi yang sangat baik (daya tahan sampai 10 tahun atau lebih), energi densitas tinggi, tidak ada memori efek dan berat yang relatif lebih ringan dibandingkan dengan baterai jenis lain (Perdana, 2021).

Sel-sel baterai *Lithium-Ion* terdiri dari empat komponen utama diantaranya katoda, anoda, elektrolit dan pemisah. Bahan elektroda dalam baterai lithium-ion adalah lithium metal oxixde untuk bahan katoda yang memiliki sebuah struktur terowongan pada arus kolektor aluminium dan *lithiated graphite* untuk bahan anoda yang memiliki struktur berlapis pada tembaga arus kolektor (Aswir & Misbah, 2018).

Dalam proses *discharge*, lithium di anoda terionisasi dan dipancarkan ke elektrolit. Ion lithium bergerak melalui pemisah dan kemudian masuk ke dalam lubang berukuran atom di katoda *lithium metal oxide*. Pada saat yang sama, elektron dilepaskan dari anoda. Hal ini menjadi perjalanan arus listrik ke beban eksternal. Selama pengisian siklus, ion lithium pergi dari katoda ke anoda melalui separator. Oleh karena itu, sel lithium ion dapat diisi ulang berdasarkan reaksi *reversible* yang terjadi (Aswir & Misbah, 2018).

Baterai *lithium-ion* memiliki beberapa kelebihan dibandingkan jenis lain yang dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2. 1 Tabel Perbandingan Baterai *Lithium-Ion* dengan Jenis Lain
(Aswir & Misbah, 2018)

Type Baterai	Lead-Acid	Ni-Cd	Ni-MH	Li-Ion
Energi Densiti (W/kg)	30-50	45-80	60-120	110-160
Power Densiti	180	150	250-1000	1800
Tegangan Nominal	2 Volt	1,25 Volt	1,25 Volt	3,6 Volt
Toleransi <i>Overcharge</i>	Tinggi	Sedang	Rendah	Sangat Rendah
<i>Self Discharge</i>	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Rendah
Temperatur Operasi	-20-60° C	-40-60° C	-20-60° C	-20-60° C
Siklus Hidup	200-300	1500	300-500	500-1000

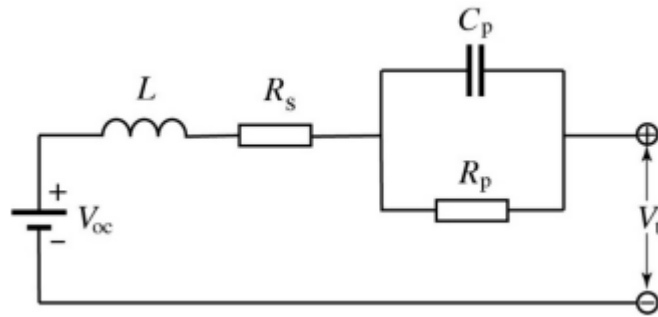
2.4. Metode Pengukuran Resistansi Internal Baterai

Metode untuk menghitung resistansi internal baterai meliputi metode injeksi AC (*AC Injection Method*), keunggulan metode injeksi AC diantaranya:

1. Pengukuran resistansi internal dilakukan secara *On-Line*, tidak memerlukan kondisi statis atau status *offline*. Oleh karena itu, pengukuran mampu menghindari kegagalan sambungan dan dalam waktu yang sama dapat mendapatkan hasil pengukuran secara akurat dan andal.
2. Metode pengukuran injeksi AC menghindari akumulasi kerusakan kinerja baterai yang disebabkan oleh pengosongan tingkat tinggi dan tidak mempengaruhi pengoperasian sistem penyimpanan energi yang aman.
3. Metode pengukuran injeksi AC tidak memerlukan beban buangan (*dump load*), dan mengurangi biaya perawatan baterai.

Baterai dianggap sebagai sumber tegangan karena digunakan untuk menyimpan dan mengirimkan energi. Namun, baterai bukanlah sumber tegangan yang ideal karena beberapa resistansi dan reaktansi internal. Gambar 2.2

menunjukkan rangkaian ekivalen RLC baterai dimana V_{OC} adalah tegangan rangkaian terbuka baterai dan V_t adalah tegangan terminal baterai. Resistansi Ohmik (R_s) dan resistansi terpolarisasi (R_p). Komponen reaktansi meliputi induktansi (L) dan kapasitansi terpolarisasi (C_p) (Pušara, n.d.-a).



Gambar 2. 2 Rangkaian Ekivalen RLC (Kuntinugunetanon et al., 2021b)

Pada frekuensi rendah, impedansi menyimpulkan resistansi internal sebagai

$$r = R_s + R_p \quad (2. 2)$$

Secara umum, kita dapat menghitung impedansi internal seperti contoh yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 asumsikan sinyal frekuensi AC yang diinjeksikan ke baterai adalah ω . Besarnya z dihitung dengan

$$|z| = \left(\left(R_s + \frac{R_p}{\omega^2 C_p^2 R_p^2 + 1} \right)^2 + \left(\frac{\omega^2 C_p R_p^2}{\omega^2 C_p^2 R_p^2 + 1} - \omega L \right)^2 \right)^{1/2} \quad (2. 3)$$

Metode yang dilakukan untuk mengukur resistansi internal adalah dengan menggunakan Volt meter AC dan Ammeter AC untuk mengukur tegangan dan arus AC. Pengaturan eksperimental ditunjukkan pada Gambar 2.3. Sinyal eksitasi dihasilkan oleh sumber arus AC. Kapasitor digunakan untuk memblokir arus DC baterai untuk melindungi sumber arus AC. Arus AC adalah

$$i = i_{max} \sin(\omega t) \quad (2.4)$$

Dan respon tegangan AC pada baterai adalah

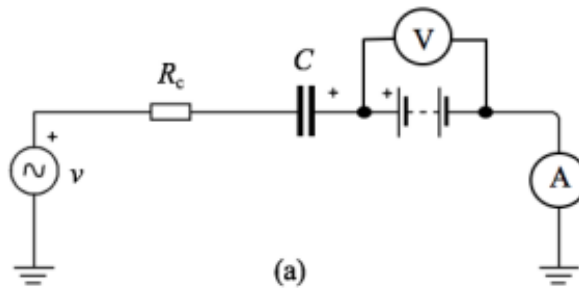
$$v = v_{max} \sin(\omega t + \phi) \quad (2.5)$$

Oleh karena itu, impedansi adalah

$$z(\omega) = \frac{v_{max}}{i_{max}} e^{j\phi} \quad (2.6)$$

Kemudian, modulus impedansi adalah

$$|z(\omega)| = \frac{v_{max}}{i_{max}} = \frac{v_{rms}}{i_{rms}} \quad (2.7)$$



Gambar 2.3 Metode Pengukuran Modulus Impedansi pada Baterai
Lithium-Ion (Kuntinugunetanon et al., 2021b)

Ketika frekuensi sinyal AC diinjeksikan ke baterai dengan nilai tetap diantara beberapa ratus Hz sampai 10.000 Hz, kurva resistansi internal AC baterai relatif stabil. Jadi nilai frekuensi yang dipilih pada penelitian ini adalah 1 kHz.

Persamaan 2.3 menunjukan jika ω lebih kecil, bagian imajiner resistansi internal mendekati nol, $\omega C_P R_P$ bagian sebenarnya mendekati nol. Jadi lebih sesuai untuk menghilangkan efek kapasitansi yang membuat impedansi murni mendekati ke $(R_S + R_P)$. Sebaliknya jika ω terlalu besar, kapasitansi akan mengecil, nilai pengukuran impedansi akan sepenuhnya mengabaikan resistansi polarisasi (R_P), dan mempertahankan resistansi internal baterai mendekati ke resistansi ohmic (R_S).

Eksperimen menunjukan bahwa resistansi ohmic pada katoda merupakan komponen penting dari keseluruhan sel impedansi. Resistansi ohmic berpengaruh

pada kapasitas baterai, laju pengisian dan laju pengosongan (Zhang et al., 2014). Modul pengukuran ini memilih frekuensi 1 kHz sinyal AC yang diinjeksikan ke baterai dan mengukur resistansi internal melalui modul impedansi yang dicapai dengan menghitung puncak respon tegangan AC pada baterai.

2.5. DDS Function Generator

Generator fungsi DDS (*Direct Digital Synthesis*) adalah instrumen elektronik yang menghasilkan bentuk gelombang yang presisi, sangat stabil dan dapat disesuaikan bentuk gelombangnya, seperti sinus, persegi, segitiga, gergaji dan pulsa. Generator fungsi DDS juga memungkinkan untuk mengubah frekuensi, amplitudo (tegangan), dan offset DC sinyal dengan mudah.



Gambar 2. 4 DDS *Function Generator*

Gambar 2.4 merupakan *function generator* yang akan digunakan sebagai sumber AC pada penelitian ini. *Function generator* akan diatur untuk mengeluarkan frekuensi AC sebesar 1kHz.

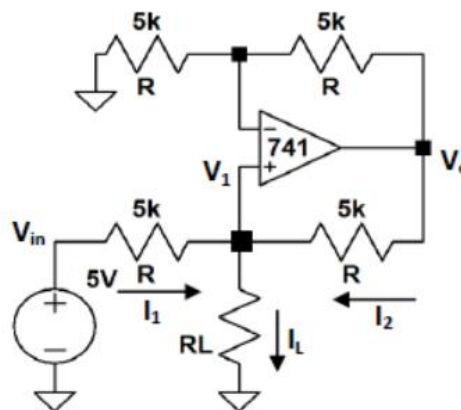
2.6. Sumber Arus AC

Sumber arus terdapat dua jenis yakni *dependent* dan *independent*. Sumber arus *independent* atau sumber arus bebas adalah sumber arus yang besarnya pasti tidak tergantung dengan elemen lain pada rangkaian. Sedangkan sumber arus

dependent atau tak bebas adalah sumber arus yang besarnya tergantung dengan elemen lain, misalnya tergantung pada sumber arus yang lain. Karena itu, sumber arus tak bebas ini sering juga disebut dengan *controlled current source* (sumber arus yang terkontrol). (BELLA PITALOKA 2019, n.d.)

Howland current source adalah sumber arus tegangan terkontrol dengan beban yang terhubung ke *ground*. Suatu rangkaian sumber arus yang menggunakan penguat operasional (*Op-Amp*) dan jaringan resistor untuk menghasilkan arus keluaran yang besarnya sebanding dengan tegangan masukan serta relatif tidak dipengaruhi oleh perubahan impedansi beban. Keunggulan utama rangkaian *howland current source* adalah kemampuannya menghasilkan arus konstan dengan impedansi keluaran yang tinggi sehingga cocok digunakan sebagai sumber arus AC pada pengukuran resistansi internal baterai metode injeksi AC

Prinsip kerja *howland current source* didasarkan pada umpan balik negatif (*negative feedback*) dari penguat operasional. Penguat operasional akan mengatur tegangan keluarannya sedemikian rupa sehingga arus yang mengalir melalui beban tetap konstan meskipun nilai resistansi beban berubah. Secara umum rangkaian *howland current source* ditunjukkan pada gambar 2.6



Gambar 2. 5 Rangkaian *Howland Current Source*
(BELLA PITALOKA 2019, n.d.)

Gambar 2.5 merupakan rangkaian *howland current source* dimana pada rangkaian ini satu terminal beban R_L terhubung ke *ground* dan arus beban dikontrol oleh tegangan input V_{in} . Pada rangkaian ini terlebih dahulu ditentukan V_1 pada terminal input non-inverting dan kemudian menetapkan hubungan antara V_1 dan arus beban. Berdasarkan rumus pembagi tegangan, didapatkan persamaan untuk mencari nilai pada V_1 sebagai berikut:

$$V_1 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_{in} \quad (2.8)$$

Berdasarkan pada hukum kirchoff yang menyatakan $I_{in} = I_{out}$, didapatkan persamaan untuk terminal *non-inverting* sebagai berikut:

$$I_1 + I_2 = I_L \quad (2.9)$$

Kemudian didapatkan,

$$I_1 R + I_2 R = I_L R_L \quad (2.10)$$

$$(V_{in} - V_1) + (V_o - V_1) = I_L R_L \quad (2.11)$$

Atau,

$$V_{in} + V_o - 2V_1 = I_L R_L \quad (2.12)$$

Sehingga diperoleh nilai arus,

$$I_L = \frac{V_{in}}{R_L} \quad (2.13)$$

Keterangan:

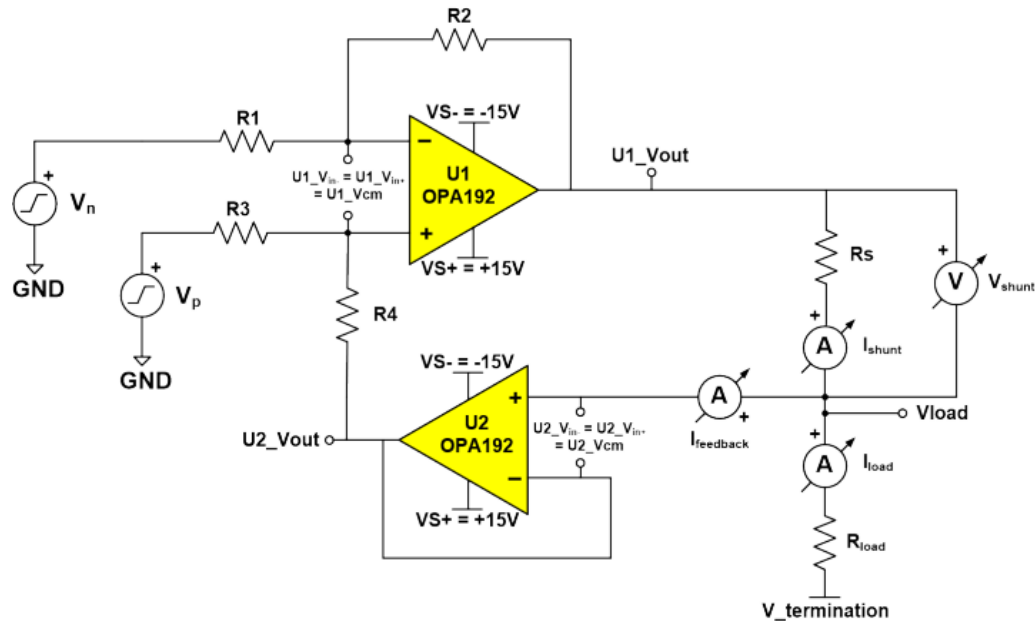
V_o : Tegangan keluaran (V)

I_L : Arus pada load (A)

R_L : Resistor pada load (Ω)

V_{in} : Tegangan masukan (V)

Untuk memperbaiki kinerja dari rangkaian *Howland Current Source* maka diusulkan modifikasi dari rangkaian *Howland Current Source* seperti pada gambar 2.7.



Gambar 2. 6 *Howland Current source with buffer*
(Texas Instruments, 2020)

Gambar 2.6 adalah rangkaian dari modifikasi *Howland Current Source with buffer* yang memiliki kemampuan menghasilkan arus keluaran yang stabil dengan impedansi keluaran tinggi. Penambahan *buffer* meningkatkan kemampuan penggerak beban serta mengurangi pengaruh arus umpan balik dan noise termal. Akurasi rangkaian sangat dipengaruhi oleh kesesuaian nilai resistor dan karakteristik op-amp yang digunakan. Oleh karena itu, rangkaian modifikasi *Howland Current Source* sangat sesuai digunakan sebagai sumber arus AC pada sistem pengukuran resistansi internal baterai *Lithium-Ion* menggunakan metode injeksi AC.

2.7. Power Supply DC



Gambar 2. 7 Power Supply DC

Gambar 2.7 merupakan *power supply* DC yang digunakan pada penelitian ini. *Power supply* DC ini digunakan sebagai suplai tegangan untuk Op-Amp pada rangkaian sumber arus konstan *howland*, juga sebagai suplai pada proses *charging*.

2.8. Penelitian Terkait

Penelitian mengenai pengukuran resistansi internal baterai sudah banyak dilakukan sebelumnya oleh beberapa pihak dengan *variable* yang berbeda. Hasil dari penelitian tersebut dituangkan dalam jurnal yang dapat dijadikan sebagai referensi guna menjadi pembanding atau pemahaman lebih lanjut mengenai sistem pengukuran yang diteliti. Pada tabel merupakan studi yang berkaitan dengan penelitian yang sedang dilakukan.

Tabel 2. 2 Jurnal Terkait Penelitian

No	Judul	Pengarang	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
1	<i>On-line Measurment of Internal Resistance of Lithium Ion Battery for EV and its Application Research</i> (Zhang et al., 2014).	Hua Zhang, Rengui Lu, Chunbo Zhu dan Yongping Zhao	<i>School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, China, 2014</i>	Pada penelitian ini dilakukan perancangan modul pengukuran resistansi internal baterai Lithium-Ion menggunakan metode AC <i>analysist</i> untuk pengaplikasian pada Mobil Listrik. Penelitian ini mempelajari karakteristik temperatur pada baterai Lithium-Ion. Juga mempelajari hubungan antara resistansi internal dan SOC, arus pengisian dengan eksperimen, hubungan antara resistansi internal dan <i>default</i> baterai seperti ketidakkonsistenan baterai, arus pengisian berlebih, perubahan kondisi kerja dan <i>overcharging</i> .
2	<i>Battery Internal Resistance Measurement – AC Method Phase Calculation Algorithm</i> (Pušara, n.d.-a)	Vladimir Pusara dipl.eng.el, Ajdin Mulaosmanovic msc.eng.el, Armin Fazlic msc.eng.el	-	Penelitian ini mendesain devais pengukuran resistansi internal baterai dan implimentasi dari metode numerik untuk perhitungan fasa dan perhitungan

No	Judul	Pengarang	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
				impedansi dari pengujian arus AC yang mengalir menuju baterai dan tegangan AC diukur pada baterai.
3	<i>Internal Resistance Measurement of Li-Ion Batteries using AC Methods</i> (Kuntinugunetanon et al., 2021b)	S Kuntinugunetanon, W Meesiri dan W Wongkokua	<i>Departement of Phisics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok, 2021</i>	Pada penelitian ini melakukan pengukuran resistansi internal baterai Lithium-Ion berdasarkan metode AC. Dilakukan dua metode pengukuran resistansi internal pada baterai Li-Ion 18650. Metode pertama menggunakan AC volt meter dan AC ammeter untuk mengukur tegangan dan arus AC. Metode kedua menggunakan dua AC volt meter untuk mengukur tegangan pada baterai dan tegangan pada resistor. Pengaturan eksperimen mirip dengan metode pertama, kecuali mengganti ammeter ke voltmeter. Pada kedua metode tersebut frekuensi pengukuran divariasikan untuk

No	Judul	Pengarang	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
				mempelajari pengaruh terhadap resistansi internal. Frekuensi sumber arus AC yang divariasikan berkisar antara 10 Hz hingga 150 kHz. Namun, frekuensi dari 1 kHz hingga 2 kHz pada kedua metode tersebut dapat digunakan untuk mengukur resistansi internal baterai Li-ion secara konsisten.
4	Estimasi <i>State of Charge</i> (SOC) pada Baterai <i>Lead-Acid</i> menggunakan Metode <i>Coulomb Counting</i> pada PV <i>Hybrid</i> (Elektro, 2018)	Zainul Rahmawan	Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018	Penelitian ini melakukan pengukuran <i>State of Charge</i> (SOC) baterai dengan metode <i>Coulomb Counting</i> . Penentuan estimasi SOC dengan metode ini dilakukan dengan menjumlahkan muatan yang masuk atau muatan yang keluar pada baterai dalam kurun waktu tertentu. Penjumlahan muatan dilakukan dengan melakukan penjumlahan perkalian arus dan waktu pada baterai, baik pada saat pengisian dan pengosongan.

Perbedaan dengan penelitian yang sedang dilakukan adalah proses pengambilan data juga beberapa komponen yang dipilih dan pengujian analisis yang dipilih. Pembacaan data dilakukan menggunakan osiloskop. Beberapa komponen yang digunakan adalah *function generator* yang berfungsi sebagai input injeksi AC ke baterai. Rangkaian sumber arus *Howland* yang berfungsi sebagai sumber arus AC konstan yang dikombinasikan dengan rangkaian AC kopling yang berfungsi sebagai blokir DC. Pengujian analisis yang dipilih adalah pada proses *overcharging* untuk mengetahui perubahan resistansi internal baterai akibat kondisi *overcharging*.