

**MENGENAL LEBIH DEKAT
BATERAI DAN *ULTRACAPACITOR***

deepublish / publisher

UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

MENGENAL LEBIH DEKAT BATERAI DAN *ULTRACAPACITOR*

Vita Lystianingrum

 deepublish

Cerdas, Bahagia, Mulia, Lintas Generasi.

MENGENAL LEBIH DEKAT BATERAI DAN *ULTRACAPACITOR*

Vita Lystianingrum

Desain Cover :
Dwi Novidiantoko

Sumber :
Agung Perkasa Nugraha

Tata Letak :
Gofur Dyah Ayu

Proofreader :
Mira Muarifah

Ukuran :
xvi, 88 hlm, Uk: 17.5x25 cm

ISBN :
No ISBN

Cetakan Pertama :
Bulan 2021

Hak Cipta 2021, Pada Penulis

Isi di luar tanggung jawab percetakan

Copyright © 2021 by Deepublish Publisher
All Rights Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang.
Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini
tanpa izin tertulis dari Penerbit.

PENERBIT DEEPUBLISH
(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

Jl.Rajawali, G. Elang 6, No 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman
Jl.Kaliurang Km.9,3 – Yogyakarta 55581

Telp/Faks: (0274) 4533427

Website: www.deepublish.co.id

www.penerbitdeepublish.com

E-mail: cs@deepublish.co.id

KATA PENGANTAR

Baterai telah menjadi bagian tak terpisahkan dari kehidupan kita. Perkembangan dan inovasi terkait teknologi dan aplikasi baterai terus melaju pesat. Di sisi lain, *ultracapacitor*, juga termasuk dalam kategori media penyimpanan energi, baru mulai banyak dikenal dalam satu dekade terakhir. *Ultracapacitor*, sering juga disebut sebagai *supercapacitor*, *electrochemical capacitor*, atau *electric double layer capacitor* (EDLC), adalah kapasitor dengan kerapatan energi yang jauh lebih tinggi daripada kapasitor konvensional, dan memiliki kapasitansi hingga puluhan ribu Farad. Salah satu keunggulan utama *ultracapacitor* dibandingkan dengan baterai adalah kerapatan dayanya yang tinggi dan usia penggunaan (siklus *charge discharge* berulang) yang jauh lebih panjang. Lalu mengapa penggunaan dan teknologi *ultracapacitor* masih terkesan dini dibandingkan baterai yang sudah matang? Apakah *ultracapacitor* dapat menjadi alternatif dari baterai? Apakah sebenarnya perbedaan karakteristik baterai dan *ultracapacitor*?

Buku ini diharapkan dapat menjawab pertanyaan-pertanyaan serupa. Jika kita selama ini telah begitu familier dengan baterai, buku ini mencoba mengajak kita melihat lebih dalam meliputi konstruksi, material, dan mekanisme kerja baterai, untuk lebih memahaminya. Di sisi lain, jika *ultracapacitor* masih asing bagi kita, buku ini mencoba memperkenalkan apa dan bagaimanakah teknologi dan aplikasi *ultracapacitor* tersebut.

Materi buku ini adalah salah satu hasil dari keterlibatan penulis dengan topik riset terkait *ultracapacitor* dan baterai sejak tahun 2013, saat pertama kalinya penulis berkenalan dengan *ultracapacitor* sebagai topik utama studi doctoral penulis. Saat itu, buku teks maupun artikel ilmiah terkait *ultracapacitor* masih sangat terbatas jumlahnya. Seiring berjalannya waktu, semakin banyak penelitian terkait *ultracapacitor*,

termasuk juga hibridisasi *ultracapacitor* dan baterai, yang juga dibahas pada buku ini.

Untuk itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada Prof. Vassilios Agelidis dan Dr. Branislav Hredzak yang telah memperkenalkan teknologi dan aplikasi *ultracapacitor*; terima kasih juga kepada kolega di Departemen Teknik Elektro ITS maupun rekan-rekan lain atas diskusi selama ini. Akhir kata, diskusi, koreksi, maupun saran dari pembaca sekalian sangat diharapkan oleh penulis untuk perbaikan dan penyempurnaan buku ini di masa datang.

Surabaya, Agustus 2021

Vita Lystianingrum
vita@ee.its.ac.id

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Baterai dan <i>Ultracapacitor</i>	1
1.2. Terminologi	4
Sel baterai dan baterai.....	4
Kapasitor “konvensional” dan <i>ultracapacitor</i>	5
1.3. Spesifikasi Teknis Baterai dan <i>Ultracapacitor</i>	6
Kapasitas baterai (Ah).....	7
Tegangan <i>cutoff (cutoff voltage)</i>	9
<i>Discharge</i> berlebih (<i>overdischarge</i>) dan <i>charge</i> berlebih (<i>overcharge</i>)	9
<i>Depth of Discharge (DoD)</i>	9
<i>State of Charge (SoC)</i>	9
C rate.....	10
Kerapatan daya	11
Kerapatan energi.....	11
Siklus (<i>cycle</i>) dan usia (<i>cycle life</i>).....	11
<i>Self-discharge</i> atau arus bocor	13
1.4. Rumus-Rumus Dasar dan Hubungan Seri Paralel.....	14
Sel baterai terhubung seri	14
Sel baterai terhubung paralel	15
Sel <i>ultracapacitor</i> terhubung seri	15
Sel <i>ultracapacitor</i> terhubung paralel	16

BAB 2 PERBEDAAN KARAKTERISTIK BATERAI DAN ULTRACAPACITOR.....	18
2.1. Pendahuluan.....	18
2.2. Konstruksi Dasar dan Mekanisme Penyimpanan Energi Baterai	18
Konstruksi dasar sel baterai.....	18
Mekanisme penyimpanan energi pada sel baterai.....	20
Jenis material kimia sel baterai.....	23
2.3. Konstruksi Dasar Mekanisme Penyimpanan Energi <i>Ultracapacitor</i>	23
Kapasitor konvensional.....	23
<i>Ultracapacitor</i>	26
Perbedaan <i>ultracapacitor</i> dengan kapasitor konvensional.....	28
2.4. Perbedaan Karakteristik Baterai dan <i>Ultracapacitor</i>	32
Kerapatan daya dan kerapatan energi.....	33
Kecepatan serta sifat simetri <i>rate charge discharge</i>	35
Usia kerja atau <i>cycle life</i>	36
Pengaruh temperatur dan aspek termal.....	36
Karakteristik tegangan versus DoD	38
2.5. Contoh Aplikasi <i>Ultracapacitor</i>	39
Pengereman regeneratif.....	39
Sistem akselerasi pada kendaraan	40
Kendaraan transit.....	40
Jaringan listrik (<i>electrical grid</i>) dan aplikasi energi terbarukan.....	41
Penyokong daya (<i>power buffer</i>) aplikasi berdaya rendah	41
BAB 3 PEMODELAN BATERAI DAN ULTRACAPACITOR.....	43
3.1. Pendahuluan.....	43
Pemodelan.....	43
Parameterisasi.....	44
3.2. Model RC	44
Baterai [30]–[32].....	44

	<i>Ultracapacitor</i> [33], [34].....	45
3.3.	Model <i>State Space</i> [31].....	47
	Baterai [30].....	48
	<i>Ultracapacitor</i> [31].....	50
	Penggunaan model state-space.....	50
3.4.	Model Berbasis Sumber Tegangan [32], [36].....	50
3.5.	Parameterisasi Baterai dan <i>Ultracapacitor</i>	54
	Parameterisasi dengan perhitungan berdasarkan rangkaian ekuivalen	55
	Parameterisasi menggunakan metode optimisasi	58
BAB 4	ASPEK TERMAL BATERAI DAN ULTRACAPACITOR	59
4.1.	Pendahuluan	59
4.2.	Rangkaian Termal (<i>Thermal Circuit</i>).....	59
	4.2.1. Resistans Termal Konduksi, Resistans Termal Konveksi, dan Pendinginan	62
	4.2.2. Resistans Termal untuk Analisis Termal Kondisi Tunak.....	63
	4.2.3. Kapasitans Termal, Konstanta Waktu Termal, dan Analisis Termal Kondisi Transien [42].....	64
BAB 5	PENENTUAN KAPASITAS BATERAI DAN ULTRACAPACITOR.....	67
5.1.	Pendahuluan	67
	Contoh 1: Penentuan kapasitas baterai untuk sistem PV <i>stand alone</i>	68
	Contoh 2: Penentuan kapasitas <i>ultracapacitor</i> untuk derek (<i>crane</i>) pelabuhan	69
5.2.	Contoh-Contoh Lain.....	72
BAB 6	SISTEM HIBRIDA BATERAI-ULTRACAPACITOR	73
6.1.	Pendahuluan	73
6.2.	Sistem Hibrida: Mengapa?.....	73
6.3.	Ulasan Sistem Penyimpan Energi Hibrida.....	74
	Hitachi-Sistem hibrida baterai <i>lead-acid</i> dan <i>lithium-ion capacitor</i> , Jepang [55].....	74

Hitachi–Sistem hibrida baterai lithium-ion dan baterai sodium-sulfur, Jerman [56].....	74
Nawa Racer–Sistem hibrida baterai lithium-ion dan <i>ultracapacitor</i> untuk sepeda motor [57]	75
European Maritime Safety Agency–Sistem hibrida hidrogen– <i>fuel cell</i> dan baterai untuk kapal laut [58].....	75
6.4. Ulasan Sistem Hibrida Baterai– <i>Ultracapacitor</i>	75
6.4.1. Topologi Sistem Hibrida Baterai– <i>Ultracapacitor</i>	75
Topologi pasif.....	76
Topologi semi aktif.....	77
Topologi aktif penuh (<i>full</i> aktif).....	77
6.4.2. Algoritma Pembagian Daya (<i>Power Sharing</i>).....	78
Pembagian daya berdasarkan aturan (<i>rule-based method</i>).....	78
Pembagian daya berdasarkan algoritma <i>filtering</i>	79
Pembagian daya menggunakan kontrol cerdas.....	80
6.5. Penentuan Kapasitas Sistem Hibrida Baterai– <i>Ultracapacitor</i>	81
DAFTAR PUSTAKA.....	83



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1.	Perbandingan baterai dan <i>ultracapacitor</i> secara umum [8].....	14
Tabel 2.1.	Material penyusun dan spesifikasi beberapa jenis sel baterai.....	23
Tabel 4.1.	Analogi parameter rangkaian termal dan listrik.....	60
Tabel 4.2.	Beberapa nilai tipikal koefisien transfer panas.....	63
Tabel 5.1.	Rangkuman langkah penentuan kapasitas baterai dan <i>ultracapacitor</i>	67
Tabel 5.2.	Kutipan faktor koreksi kapasitas sel baterai tipe <i>vented</i> dan VRLA dari IEEE Std 485™-2020 [43].....	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Contoh bermacam-macam tipe baterai. Atas kiri: Baterai primer jenis alkaline bentuk silinder. Atas kanan: Baterai primer jenis lithium bentuk kancing. Bawah kiri: Baterai asam timbal (<i>lead acid</i>). Bawah kanan: Baterai lithium polymer berbentuk <i>pouch</i>	2
Gambar 1.2.	<i>Ultracapacitor</i> berkapasitans 350 F beserta kapasitor konvensional 0,047 F [1] (kiri); <i>Ultracapacitor</i> 100 F (tengah) dan 650 F (kanan).....	3
Gambar 1.3.	Contoh sel <i>ultracapacitor</i> berbentuk silinder maupun <i>pouch</i> serta modul <i>ultracapacitor</i>	3
Gambar 1.4.	Simbol sel baterai dan baterai multisel.....	4
Gambar 1.5.	Contoh satu sel baterai, berbentuk kancing (kiri) dan silinder (kanan).....	4
Gambar 1.6.	Aki kendaraan bermotor (baterai <i>lead acid</i>) [2] bertegangan 12 V sebenarnya terdiri dari lebih dari satu sel.....	5
Gambar 1.7.	Klasifikasi <i>ultracapacitor</i>	6
Gambar 1.8.	Cuplikan <i>datasheet</i> baterai LithiumWerks Li-Ion ANR26650M1B [5].....	7
Gambar 1.9.	Adaptasi cuplikan <i>datasheet</i> Panasonic Li-ion UR18650A[6]: Grafik tegangan baterai versus kapasitas ter- <i>discharge</i>	8
Gambar 1.10.	Adaptasi cuplikan <i>datasheet</i> Panasonic Li-ion UR18650A [6]: kapasitas <i>discharge</i> baterai untuk <i>C rate</i> berbeda.....	10

Gambar 1.11.	Cuplikan <i>datasheet ultracapacitor</i> Maxwell 3 V 3400 F [7].	12
Gambar 1.12.	Rangkaian seri dari empat sel baterai.	14
Gambar 1.13.	Rangkaian paralel dari empat sel baterai.	15
Gambar 1.14.	Rangkaian seri dari empat <i>ultracapacitor</i> .	16
Gambar 1.15.	Rangkaian paralel dari empat <i>ultracapacitor</i> .	16
Gambar 2.1.	Konstruksi sederhana suatu sel baterai <i>lead acid</i> dalam kondisi penuh [9].	19
Gambar 2.2.	Konstruksi sederhana suatu sel baterai lithium-ion dalam kondisi penuh.	20
Gambar 2.3.	Sel baterai <i>lead acid</i> saat <i>discharge</i> [9].	21
Gambar 2.4.	Sel baterai lithium-ion saat <i>discharge</i> .	22
Gambar 2.5.	Konstruksi kapasitor pelat sejajar dan posisi muatan saat kapasitor tidak terisi [10].	24
Gambar 2.6.	Kapasitor pelat sejajar tanpa dielektrik: (a) mengalami pengisian. (b) telah terisi [10].	25
Gambar 2.7.	Konstruksi dasar suatu sel <i>ultracapacitor</i> dan posisi muatan saat kapasitor belum terisi.	27
Gambar 2.8.	Gambar potongan yang diperbesar: Elektrode, elektrolit, dan muatan saat <i>ultracapacitor</i> belum terisi ⁹ .	27
Gambar 2.9.	Gambar potongan yang diperbesar: Elektrode, elektrolit, dan muatan saat <i>ultracapacitor</i> sudah terisi ⁹ .	28
Gambar 2.10.	Ilustrasi rentang tegangan dan kapasitans untuk bermacam-macam tipe kapasitor [11].	29
Gambar 2.11.	Kiri: <i>ultracapacitor</i> 350 F 2,5 V berdiameter 3,2 cm. Kanan: kapasitor elektrolit aluminium 0,047 F 25 V [1].	30
Gambar 2.12.	Diagram Bode perbandingan respons frekuensi kapasitor konvensional dan <i>ultracapacitor</i> [1]. Atas: magnitudo impedansi versus frekuensi. Bawah: sudut fase versus frekuensi.	31
Gambar 2.13.	Perbandingan kerapatan energi dan kerapatan daya volumetrik penyimpan energi berbeda [8].	34

Gambar 2.14.	Perbandingan energi spesifik dan daya spesifik penyimpan energi berbeda [8].	34
Gambar 2.15.	Analogi wadah dan lubang air untuk menggambarkan kerapatan energi dan kerapatan daya <i>ultracapacitor</i> (kiri) dan baterai (kanan) [14].	35
Gambar 2.16.	Cuplikan <i>datasheet</i> Panasonic Li-ion UR18650A [6]: perubahan kapasitas <i>discharge</i> baterai akibat perubahan temperatur.	37
Gambar 2.17.	Cuplikan <i>datasheet</i> Maxwell <i>ultracapacitor</i> BCAP0310 dan BCAP0350 [15]: perubahan kapasitans dan resistans <i>ultracapacitor</i> akibat perubahan temperatur.	37
Gambar 2.18.	Kurva tegangan versus DoD pada baterai (kiri) dan <i>ultracapacitor</i> (kanan).	39
Gambar 3.1.	Model rangkaian ekuivalen baterai: "Model RC" [30], [31].	43
Gambar 3.2.	Model <i>ultracapacitor</i> : (a) Model RC. (b) Model tiga cabang. (c) Model banyak cabang.	46
Gambar 3.3.	Atas: Blok model <i>ultracapacitor</i> Simulink. Bawah: Rangkaian ekuivalennya [36].	47
Gambar 3.4.	Atas: Blok model <i>ultracapacitor</i> PSIM. Bawah: Rangkaian ekuivalennya [37].	47
Gambar 3.5.	Model berbasis sumber tegangan atau model generik atau model "Rint" [32].	51
Gambar 3.6.	Rangkaian ekuivalen baterai pada ADVISOR sub blok Simulink [39].	52
Gambar 3.7.	Atas: Blok model baterai generik Simulink. Bawah: Rangkaian ekuivalennya [36].	53
Gambar 3.8.	Atas: Blok model <i>ultracapacitor</i> generik Simulink. Bawah: Rangkaian ekuivalennya [36].	54
Gambar 3.9.	Contoh data tegangan dan arus hasil tes <i>charge discharge</i> dengan jeda pada <i>ultracapacitor</i> 100 F.	55
Gambar 3.10.	Detail Gambar 3.9	56

Gambar 4.1.	(a) Konstruksi tergumpal (<i>lumped</i>) sel silindris. (b) Simpul (<i>node</i>) dan resistans termalnya.....	60
Gambar 4.2.	Rangkaian termal sel tersebut. (a) Tanpa kapasitans termal. (b) Dengan kapasitans termal.....	61
Gambar 4.3.	(a) Konstruksi tergumpal sel silindris. (b) Simpul dan resistans termalnya termasuk resistans termal konveksi dan simpul temperatur sekitar.....	62
Gambar 4.4.	Ilustrasi perbandingan temperatur dinamis dua sel baterai dengan konstanta waktu termal berbeda.....	65
Gambar 4.5.	Ilustrasi perbandingan temperatur dinamis dua sel baterai dengan resistans termal berbeda.....	66
Gambar 5.1.	Ilustrasi contoh 1.....	68
Gambar 5.2.	Ilustrasi contoh 2.....	70
Gambar 5.3.	Contoh grafik daya satu siklus kerja derek pelabuhan [45].....	70
Gambar 6.1.	Ilustrasi kebutuhan daya puncak dan energi suatu aplikasi [54].....	74
Gambar 6.2.	Sistem hibrida baterai <i>ultracapacitor</i> dengan topologi pasif (a), semi aktif ((b) dan (c)), serta <i>full</i> aktif (d).....	76
Gambar 6.3.	Contoh pembagian daya sistem penyimpan energi hibrida [51], [60].....	78
Gambar 6.4.	Diagram blok pembagian daya metode <i>filtering</i>	79
Gambar 6.5.	Ilustrasi pembagian daya.....	79
Gambar 6.6.	Ilustrasi metode <i>filtering</i> + <i>fuzzy logic</i> [61].....	80
Gambar 6.7.	Ilustrasi masukan dan keluaran blok <i>fuzzy logic</i> : (a) dari [61]; (b) dari [62].....	81

deepublish / publisher

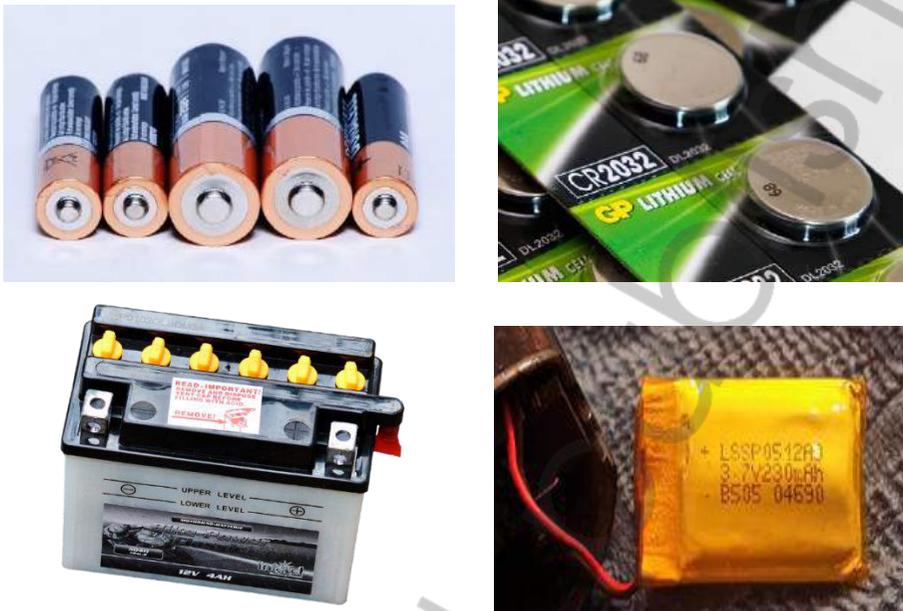
BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Baterai dan *Ultracapacitor*

Media penyimpanan energi sudah menjadi bagian tak terpisahkan dari hidup kita. Salah satu jenis penyimpanan energi yang paling banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari adalah baterai. Baterai menjadi bagian penting dari berbagai peralatan listrik mulai dari mainan, jam, senter, bel, lampu, ponsel, laptop, aki kendaraan, serta peralatan lainnya. Anda pasti juga sudah mengetahui bahwa ada baterai yang tidak dapat diisi ulang (*non rechargeable batteries*) dan yang dapat diisi ulang (*rechargeable batteries*). Baterai *non rechargeable* disebut juga sebagai baterai primer, sedangkan baterai *rechargeable* disebut sebagai baterai sekunder. Baterai yang menjadi objek pembahasan pada buku ini adalah baterai sekunder. Ilustrasi berbagai tipe baterai ditunjukkan pada Gambar 1.1.

Baterai menyimpan energi listrik dalam bentuk energi yang lain, yaitu energi kimia. Sistem sel bahan bakar-hidrogen (*hydrogen fuel cell*) juga dapat menyimpan energi listrik dalam bentuk energi kimia. Selain itu, ada banyak jenis penyimpanan energi listrik lainnya yang dapat menyimpan energi listrik dalam bentuk lain, seperti mekanis, elektromagnetik, atau yang lain. Contoh penyimpanan energi mekanis adalah *pumped hydro storage* yang menyimpan energi listrik dengan memompa air ke suatu ketinggian tertentu, atau *compressed air storage* yang menyimpan energi dalam bentuk udara yang terkompres. Sedangkan contoh penyimpanan energi dalam bentuk medan elektromagnetik adalah SMES (*superconducting magnetic energy storage*), yang menyimpan energi listrik dalam bentuk medan magnet pada suatu kumparan superkonduktor.



Gambar 1.1. Contoh bermacam-macam tipe baterai. Atas kiri: Baterai primer jenis alkaline bentuk silinder. Atas kanan: Baterai primer jenis lithium bentuk kancing. Bawah kiri: Baterai asam timbal (*lead acid*). Bawah kanan: Baterai lithium polymer berbentuk *pouch*.

Ultracapacitor sering juga disebut dengan istilah lain seperti *supercapacitor*, atau EDLC (*electric double layer capacitor*), atau EC (*electrochemical capacitor*), atau istilah lainnya. Istilah-istilah berbeda ini sebenarnya mengacu pada klasifikasi *ultracapacitor*, dan penjelasan lebih lanjut dapat dilihat di subbab 1.2.

Salah satu karakteristik utama yang membedakan *ultracapacitor* dengan kapasitor yang telah kita kenal selama ini adalah kapasitansnya yang bernilai sangat tinggi, berkisar dari 1 F sampai ke puluhan ribu Farad. Beberapa contoh *ultracapacitor* dan perbandingannya dengan kapasitor konvensional ditunjukkan pada Gambar 1.2 dan Gambar 1.3.



Gambar 1.2. *Ultracapacitor* berkapasitans 350 F beserta kapasitor konvensional 0,047 F [1]¹ (kiri); *Ultracapacitor* 100 F (tengah) dan 650 F (kanan).



Gambar 1.3. Contoh sel *ultracapacitor* berbentuk silinder maupun *pouch* serta modul *ultracapacitor*².

Ultracapacitor menyimpan energi seperti halnya kapasitor konvensional, yaitu pada muatan-muatan listriknya yang berpasangan dan terpisah pada suatu jarak tertentu. Penggunaan *ultracapacitor* tidak sepopuler baterai karena perbedaan karakteristik, namun untuk beberapa aplikasi tertentu seperti yang berdaya tinggi dengan siklus kerja (*duty cycle*) rendah, *ultracapacitor* lebih unggul daripada baterai. Dalam sepuluh tahun terakhir, penggunaan *ultracapacitor* mulai meluas dan menjadi alternatif pengganti baterai untuk aplikasi tertentu tersebut.

¹ Gambar dari [1] dan direproduksi dengan seizin IEEE.

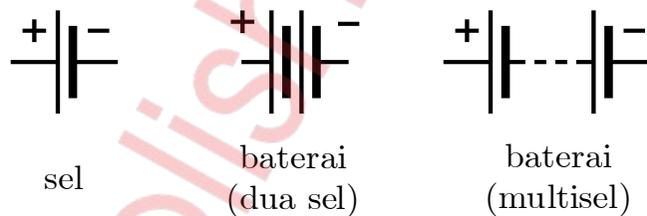
² Foto *ultracapacitor* Maxwell berlisensi CC BY-SA 3.0 dari https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Maxwell_Portfolio_Shot.jpg.

Popularitasnya juga mulai menanjak seiring dengan penggabungannya dengan baterai untuk sistem penyimpanan energi hibrida (*hybrid energi storage*), di mana karakteristik baterai yang kurang menguntungkan untuk aplikasi tertentu dikompensasi dengan karakteristik *ultracapacitor*. Paparan detail tentang aplikasi *ultracapacitor* akan diberikan di subbab 2.5, supaya Anda dapat memahami terlebih dahulu perbedaan karakteristik *ultracapacitor* dengan kapasitor konvensional dan baterai yang dijelaskan di Bab 2.

1.2. Terminologi

Sel baterai dan baterai

Secara istilah, yang dimaksud suatu “sel” adalah suatu sel elektrokimia individu yang menghasilkan nilai tegangan tertentu bergantung pada material kimianya. Sekumpulan sel akan membentuk baterai multisel atau biasa juga disebut baterai atau *battery pack* atau *battery module*. Simbol untuk suatu sel baterai dan baterai ditunjukkan pada Gambar 1.4.. Istilah “baterai” saja sering digunakan untuk menyebut secara umum baik baterai multisel maupun yang hanya terdiri dari satu sel, misalnya seperti pada Gambar 1.5.

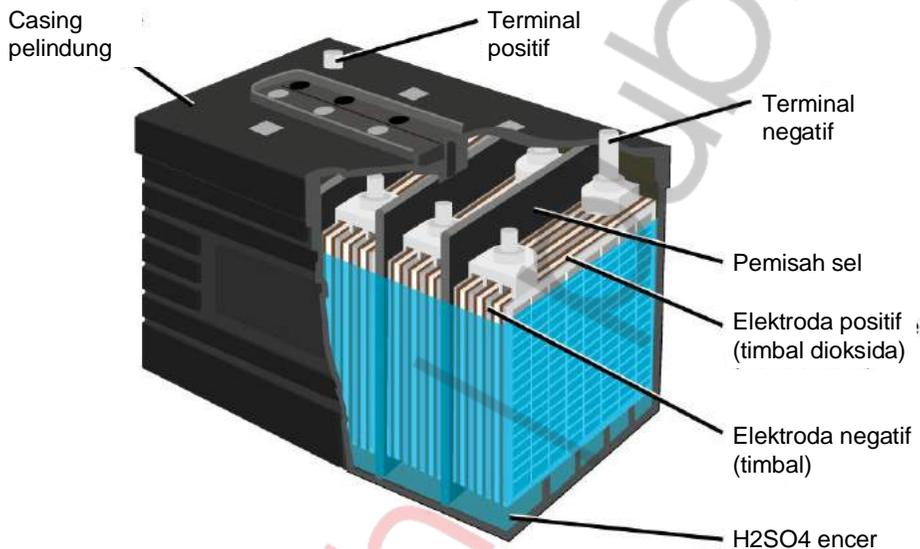


Gambar 1.4. Simbol sel baterai dan baterai multisel



Gambar 1.5. Contoh satu sel baterai, berbentuk kancing (kiri) dan silinder (kanan).

Gambar 1.6 [2] menunjukkan ilustrasi aki atau baterai mobil yang sebenarnya terdiri dari lebih dari satu sel terhubung seri sehingga memiliki tegangan total sebesar 12 V. Satu sel elektrokimia terdiri dari sepasang pelat elektroda positif dan negatif, dan penjelasan detail mengenai hal ini akan dipaparkan pada Bab 2.



Gambar 1.6. Aki kendaraan bermotor (baterai *lead acid*) [2]³ bertegangan 12 V sebenarnya terdiri dari lebih dari satu sel.

Kapasitor “konvensional” dan *ultracapacitor*

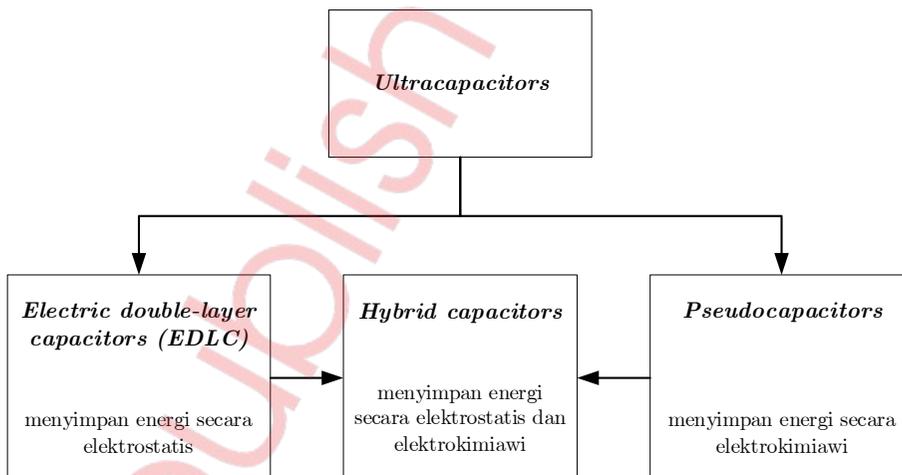
Pada buku ini, istilah “kapasitor konvensional” merujuk pada kapasitor selain *ultracapacitor*, dengan nilai kapasitans berorde pf (pico Farad) sampai sekitar 1 F. Dengan definisi ini, maka yang termasuk kapasitor konvensional adalah kapasitor elektrolit dan kapasitor elektrostatik. Sedangkan kapasitans *ultracapacitor* dapat mencapai hingga puluhan ribu Farad. Pembahasan lebih detail mengenai perbedaan kapasitor konvensional dengan *ultracapacitor* akan dipaparkan pada Bab 2.

Istilah “*ultracapacitor*” atau “*supercapacitor*” sendiri sebenarnya melingkupi minimal tiga kategori berbeda berdasarkan mekanisme penyimpanan energinya [3], [4], seperti ditunjukkan pada Gambar 1.7.

³ Gambar dari [2] dan berlisensi CC BY 4.0.

Kategori pertama, yaitu EDLC, menyimpan energi secara elektrostatis, dan mekanisme penyimpanan energi ini akan dijelaskan secara detail di subbab 2.3. Istilah “*ultracapacitor*” pada buku ini sebenarnya mengacu pada EDLC saja, dan tidak termasuk *pseudocapacitor* dan *hybrid capacitor*. Namun, terkadang referensi yang diacu oleh buku ini pun tidak menyebutkan dengan spesifik kategori *ultracapacitor* yang dibahas.

Secara singkat, *pseudocapacitor* menyimpan muatan dan energi dengan mekanisme dominan adalah mekanisme elektrokimiawi, seperti reaksi redoks. Kategori ketiga, yaitu *hybrid capacitor*, adalah hibridisasi media penyimpan energi di level sel. Konsep dasarnya adalah menggabungkan teknologi yang berbeda, misalnya menggunakan dua elektrode yang masing-masing memiliki mekanisme penyimpanan yang berbeda: secara elektrostatis dan secara elektrokimiawi. Produk komersial *hybrid capacitor* juga umum menggunakan istilah *supercapacitor* atau *ultracapacitor* saja, atau menggunakan istilah lain seperti *hybrid ultracapacitor* (misalnya Aowei), *hybrid supercapacitor* (misalnya Eaton), atau lebih spesifik lagi, seperti *lithium-ion capacitor* (misalnya JSR Micro dan Taiyo Yuden).



Gambar 1.7. Klasifikasi *ultracapacitor*

1.3. Spesifikasi Teknis Baterai dan *Ultracapacitor*

Pada subbab ini akan dibahas beberapa parameter yang sering digunakan untuk menyatakan spesifikasi teknis baterai dan *ultracapacitor*. Contoh-contoh dari *datasheet* juga akan ditampilkan.

Contoh cuplikan *datasheet* ditunjukkan di Gambar 1.8 untuk baterai Li-Ion ANR26650M1B [5].

Specs for ANR26650M1B	
Nominal Ratings	
Voltage	3.3 V
Capacity @ 23 °C Typ (Min)	2.6 Ah (2.5)
Energy @ 23 °C	8.25 Wh
Specific Power	2600 W/kg
Impedance (1KHz AC) Typ	6 mΩ
Cycle Life at 1C/1C, 100% DOD	> 4000 cycles
Discharging	
Max Continuous Discharge Current	50 A
Max Pulse Discharge Current (10s)	120 A
Minimum Voltage / HPPC Pulse	2 V / 1.6 V
Temperature	-30 °C to 55 °C
Charging	
Recommended Charge Current	3 A
Max Continuous Charge Current	10 A
Max Pulse Charge Current (10s)	20 A
Float Voltage	3.45 V
Recommended charge V & Cut-off Current	3.6 V, taper to 125mA
Temperature Range (reduce charging current to 250mA when under 0 °C)	0 °C to 55 °C

Gambar 1.8. Cuplikan *datasheet* baterai LithiumWerks Li-Ion ANR26650M1B [5].

Kapasitas baterai (Ah)

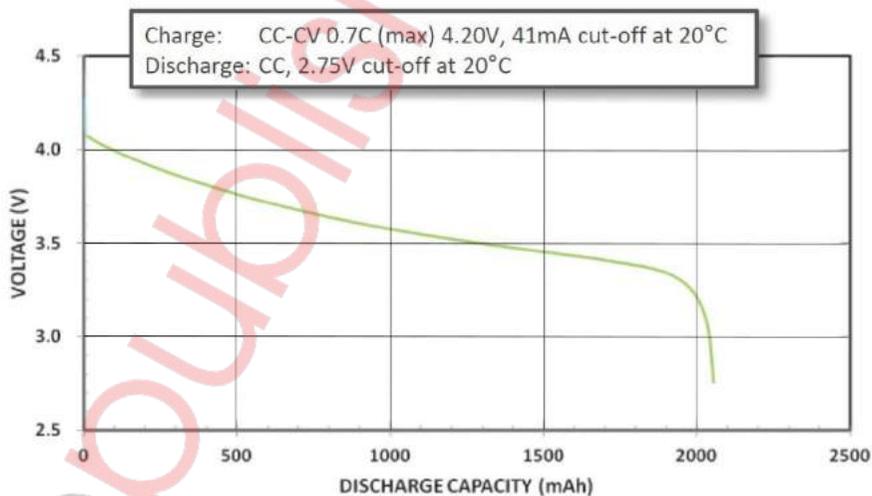
Kapasitas suatu penyimpan energi adalah jumlah energi total yang dapat disimpan, pada umumnya diukur dengan satuan Wh atau Joule. Namun, jika baterai menjadi konteks, pada umumnya kapasitas baterai tersebut diukur dengan satuan *Ampere hours* (Ah), dan pada buku ini juga akan ditulis sebagai "kapasitas (Ah)". Kapasitas (Ah) baterai menunjukkan jumlah energi total yang dapat disimpan dalam baterai, dan dinyatakan dalam muatan total yang dapat terakumulasi dan disimpan dalam baterai. Kapasitas nominal baterai sebesar 1 Ah artinya itulah jumlah muatan total yang dapat disimpan pada baterai dengan *rate* (laju) arus 1 A dan waktu pengisian sampai baterai penuh adalah 1 jam.

Contohnya, pada cuplikan *datasheet* di Gambar 1.8 tercantum kapasitas baterai adalah 2,6 Ah. Tercantum juga keterangan bahwa kapasitas ini berlaku untuk temperatur 23 °C. Hal ini terkait dengan kapasitas baterai yang dipengaruhi oleh temperatur, dan dijelaskan di Bab 2.

Mengapa kapasitas (Ah) lebih umum digunakan sebagai ukuran kapasitas baterai? Hal ini dikarenakan jika energi baterai (Wh) dihitung menggunakan perkalian tegangan, arus, dan waktu (atau kapasitas (Ah)), hasil perkalian tidak menunjukkan nilai kapasitas sebenarnya, karena ada perubahan tegangan baterai saat kondisi penuh menjadi kosong (atau sebaliknya), seperti ditunjukkan pada Gambar 1.9. Gambar tersebut adalah kurva kapasitas *discharge* versus tegangan untuk baterai Panasonic Li-ion UR18650A berkapasitas nominal 2,25 Ah.

Tegangan baterai saat kondisi penuh adalah sekitar 4,2 V. Dengan kapasitas baterai sebesar 2,25 Ah, kapasitas (Wh) tidak didapatkan dengan cara mengalikan 4,2 V dengan 2,25 Ah karena nilai tegangan berubah, namun dapat didekati dengan mengalikan kapasitas (Ah) dengan tegangan rata-rata.

Discharge Characteristics (by rate of discharge)



Gambar 1.9. Adaptasi cuplikan *datasheet* Panasonic Li-ion UR18650A[6]:
Grafik tegangan baterai versus kapasitas ter-*discharge*

Tegangan *cutoff* (*cutoff voltage*)

Tegangan *cutoff* didefinisikan sebagai batas tegangan terendah saat suatu baterai dianggap telah ter-*discharge* sampai kosong. Sebagai contoh, pada Gambar 1.9, tegangan *cutoff* baterai tersebut adalah 2,75 V.

***Discharge* berlebih (*overdischarge*) dan *charge* berlebih (*overcharge*)**

Overdischarge adalah proses *discharge* melebihi batas bawah tegangan aman baterai (atau tegangan *cutoff*) atau *ultracapacitor*. *Overcharge* adalah proses *charge* berkepanjangan setelah suatu sel baterai atau *ultracapacitor* penuh.

***Depth of Discharge* (DoD)**

Nilai DoD menunjukkan seberapa “dalam” suatu baterai di-*discharge* dengan pembanding kapasitas baterai. DoD 100% berarti baterai ini di-*discharge* sampai kosong. DoD 80% berarti baterai di-*discharge* sebesar 80% kapasitas nominal. DoD 0% berarti baterai belum di-*discharge* atau masih dalam kondisi penuh. Persamaan sederhana DoD ditunjukkan pada (1.1).

$$DoD = \frac{\text{muatan total yang didischarge}}{\text{kapasitas total}} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

***State of Charge* (SoC)**

Nilai SoC menunjukkan muatan aktual yang tersedia pada baterai, dengan pembanding kapasitas baterai. SoC 100% berarti baterai dalam kondisi terisi penuh. SoC 80% berarti baterai dalam kondisi terisi sampai 80%. SoC 0% berarti baterai dalam kondisi kosong. Persamaan sederhana SoC ditunjukkan pada (1.2), sedangkan hubungan SoC dengan DoD ditunjukkan pada (1.3).

$$SoC = \frac{\text{muatan total yang tersedia}}{\text{kapasitas total}} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

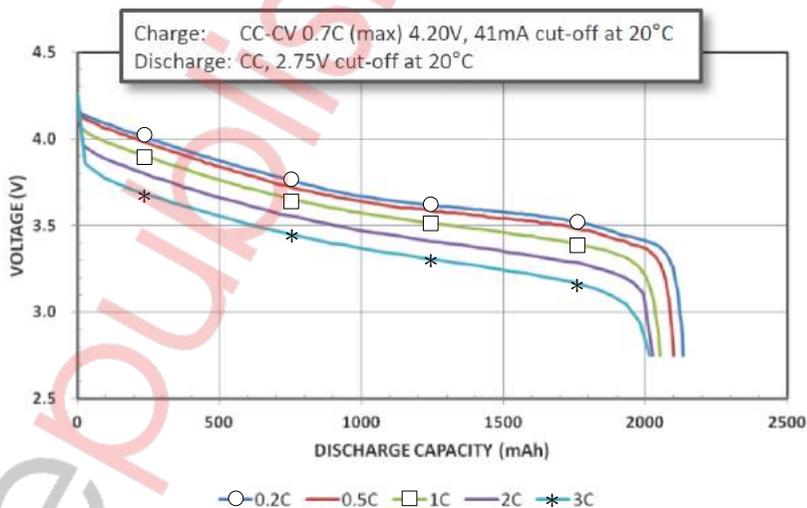
$$DoD = 100\% - SoC \quad (1.3)$$

C rate

C rate adalah suatu parameter yang berhubungan dengan besar arus baterai dan dinyatakan dengan angka, misalnya 1C; 2C; C/10; 0,1C; dan sebagainya. Suatu baterai berkapasitas 2,6 Ah memiliki nilai *C rate* 1C sebesar 2,6 A. Contohnya, jika baterai ini di-*discharge* dengan *C rate* 1C, berarti baterai di-*discharge* dengan arus sebesar 2,6 A, dan baterai akan kosong setelah 1 jam. Jika baterai di-*discharge* dengan *C rate* C/10, berarti baterai di-*discharge* dengan arus sebesar 0,26 A, dan baterai akan kosong setelah 10 jam.

Gambar 1.10 menunjukkan grafik *discharged capacity* (kapasitas *discharge*) baterai untuk *C rate* yang berbeda-beda. Tampak bahwa untuk *C rate* berbeda, kapasitas *discharge* juga dapat berbeda nilainya. Kapasitas *discharge* baterai yang di-*discharge* dengan *C rate* yang lebih tinggi ternyata lebih kecil daripada yang di-*discharge* dengan *C rate* lebih rendah. Terkait dengan ini, hukum Peukert (*Peukert's law*) memberikan hubungan antara perkiraan perubahan nilai kapasitas baterai dengan nilai *C rate* yang berbeda-beda. Hubungan pada hukum Peukert ini spesifik untuk baterai *lead acid*, namun fenomena serupa dapat dilihat pada baterai jenis lain, seperti yang telah ditampilkan pada Gambar 1.10.

Discharge Characteristics (by rate of discharge)



Gambar 1.10. Adaptasi cuplikan *datasheet* Panasonic Li-ion UR18650A [6]: kapasitas *discharge* baterai untuk *C rate* berbeda.

Kerapatan daya

Kerapatan daya suatu penyimpan energi didefinisikan sebagai besar kemampuan dayanya per satuan volume atau berat. Kerapatan daya gravimetrik didefinisikan sebagai daya per satuan berat, dengan satuan W/kg. Sedangkan kerapatan daya volumetrik didefinisikan sebagai daya per satuan volume dengan satuan W/L. Sama halnya seperti kerapatan energi, referensi lain terkadang menggunakan istilah daya spesifik (*specific power*) untuk kerapatan daya gravimetrik.

Contohnya, pada cuplikan *datasheet* di Gambar 1.8, tercantum nilai daya spesifik baterai adalah 2,6 kW/kg. Sedangkan pada cuplikan *datasheet ultracapacitor* Maxwell 3 V 3400 F [7] di Gambar 1.11, tercantum nilai daya spesifik tipikal *ultracapacitor* yang dapat digunakan (*usable specific power*) adalah 14,5 kW/kg. Perbandingan nilai umum parameter ini juga dapat dilihat pada Tabel 1.1.

Kerapatan energi

Kerapatan energi suatu penyimpan energi didefinisikan sebagai besar energinya per satuan volume atau berat. Kerapatan energi gravimetrik didefinisikan sebagai energi per satuan berat, dengan satuan Wh/kg. Sedangkan kerapatan energi volumetrik didefinisikan sebagai energi per satuan volume dengan satuan Wh/L. Jika kita merujuk referensi yang berbeda, terkadang ada istilah atau bahkan definisi lain yang digunakan. Misalnya, istilah energi spesifik (*specific energy*) yang kadang dianggap sama dengan kerapatan energi gravimetrik. Contohnya, pada Gambar 1.11, tercantum nilai energi spesifik minimal adalah 8,57 Wh/kg. Perbandingan nilai umum parameter ini juga dapat dilihat pada Tabel 1.1.

Siklus (*cycle*) dan usia (*cycle life*)

Jika suatu penyimpan energi mengalami pengisian (*charge*) dari kondisi kosong sampai penuh, lalu mengalami pengosongan (*discharge*) dari kondisi penuh sampai kosong, maka penyimpan energi tersebut telah mengalami satu kali siklus pengisian dan pengosongan (*charge discharge cycle*).

Cycle life mengukur usia suatu penyimpan energi berdasarkan jumlah siklus pengisian dan pengosongan yang diperkirakan dapat dilakukan sampai masa pakai penyimpan energi tersebut berakhir. Pada

umumnya, berakhirnya masa pakai suatu penyimpan energi didasarkan pada penurunan kapasitas nominal hingga mencapai 80%-nya. Parameter lain yang juga dapat digunakan sebagai indikator masa pakai penyimpan energi telah berakhir adalah peningkatan nilai resistans internal, misalnya sampai dengan 200% nilai resistans internal nominalnya.

Pada cuplikan *datasheet* di Gambar 1.8, tercantum nilai *cycle life* baterai adalah > 4000 siklus. *Cycle life* ini adalah berdasarkan siklus *charge discharge* yang spesifik dari produsennya. Siklus yang tercantum pada *datasheet* tersebut adalah siklus 1C/1C, 100% DoD, yang berarti baterai *discharge* dengan *rate* 1C sampai penuh, lalu di-*discharge* dengan *rate* 1C sampai kosong (DoD 100%).

PRODUCT SPECIFICATIONS

Values are referenced at T_r = room temperature and $V_R = 3.0V$ rated voltage (unless otherwise noted). Min and Max values indicate product specifications. Typical results will vary and are provided for reference. Additional terms and conditions, including the limited warranty, apply at the time of purchase.

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typical	Max	Unit
ELECTRICAL						
C_R	Initial Rated Capacitance	Note 3	3,400	–	4,080	F
R_S	Initial Equivalent Series Resistance (ESR)	100ms, Note 3	–	0.15	0.24	m Ω
V_R	Maximum Rated Voltage		–	3.0	–	V
V_{MAX}	Absolute Maximum Voltage	Note 1	–	–	3.15	V
I_{DCMAX}	Maximum Continuous Current	Note 8, 10 - $\Delta T = 15^\circ C$ (BOL) - $\Delta T = 40^\circ C$ (BOL)	–	140 225	–	A_{RMS}
I_{ACMAX}	Maximum Peak Current	Note 5	–	–	2,800	A
I_{SHORT}	Short Circuit Current	Current possible with short circuit from V_R . Do not use as operating current.	–	20,000	–	A
I_{LEAK}	Leakage Current	At 25°C, Note 4	–	–	12	mA
LIFE						
t_{AGING}	Accelerated Aging	At $V_R = 3V$ and $T_A = 65^\circ C$ (note 3,10) - Capacitance change ΔC from C_R - Resistance change ΔR from R_S	–	1,500 20 100	–	hours % %
t_{LIFE}	Projected Life Time	At $V_R = 3V$ and $T_A = 25^\circ C$ (note 3,10) - Capacitance change ΔC from C_R - Resistance change ΔR from R_S	–	10 20 100	–	years % %
n_{LIFE}	Projected Cycle Life	At $V_R = 3V$ and $T_A = 25^\circ C$ (note 3,7,10) - Capacitance change ΔC from C_R - Resistance change ΔR from R_S	–	1,000,000 25 100	–	cycles % %
t_{SHELF}	Shelf Life	Stored uncharged at 25°C, <50% RH	–	4	–	years
POWER & ENERGY						
P_d	Usable Specific Power	Note 6	9.07	14.5	–	kW/kg
P_{RMAX}	Impedance Match Specific Power	Note 6	18.9	30	–	kW/kg
E_{MAX}	Specific Energy	Note 6	8.57	–	–	Wh/kg
E_{STORED}	Stored Energy	Note 6, 9	4.25	–	–	Wh

Gambar 1.11. Cuplikan *datasheet* ultracapacitor Maxwell 3 V 3400 F [7].

Contoh lain, pada *datasheet ultracapacitor* Maxwell 3 V 3400 F di Gambar 1.11, tercantum nilai *cycle life* sebesar satu juta. Pada petunjuk produk detail, dijelaskan bahwa satu siklus yang digunakan adalah pengisian sampai tegangan maksimum tercapai, lalu pengosongan sampai setengah tegangan maksimum tercapai. Tercantum juga keterangan bahwa *cycle life* yang dapat bergantung pada aplikasi spesifiknya.

Pada *datasheet* tersebut tercantum juga parameter yang digunakan untuk mengindikasikan akhir masa pakai *ultracapacitor*, yaitu penurunan kapasitans sebesar 25% (kapasitansnya turun hingga mencapai 75% kapasitans nominalnya); atau peningkatan resistans sebesar 100%. Perbandingan nilai umum *cycle life* juga dapat dilihat pada Tabel 1.1.

***Self-discharge* atau arus bocor**

Self-discharge adalah proses *discharge* yang terjadi di dalam baterai atau *ultracapacitor* dalam kondisi normal (bukan terhubung singkat) dan tidak terhubung ke beban. Proses ini terjadi karena reaksi kimia atau interaksi antar material di level internal sel, dan arus internal yang mengalir ini diberi istilah arus bocor (*leakage current*). Mekanisme *self-discharge* mengakibatkan berkurangnya energi yang tersimpan sedikit demi sedikit. Parameter *self-discharge* menjadi penting jika aplikasi baterai atau *ultracapacitor* melibatkan jeda waktu (terdapat kondisi tidak digunakan), karena bisa terjadi penurunan energi tersimpan yang signifikan. *Self-discharge* yang tinggi adalah salah satu kelemahan *ultracapacitor* dibandingkan baterai.

Pada *datasheet* Maxwell 3 V 3400 F di Gambar 1.11 tercantum nilai arus bocor maksimal sebesar 12 mA, sedangkan pada Tabel 1.1 dapat dilihat perbandingan persentase *self-discharge* harian baterai dan *ultracapacitor*.

Tabel 1.1. Perbandingan baterai dan *ultracapacitor* secara umum [8]

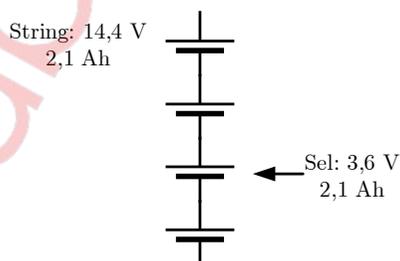
Teknologi	Baterai Lead-acid	Baterai Li-ion	Baterai NiCd	Ultracapacitor
Kerapatan energi (Wh/L)	50-90	200-500	60-150	10-30
Kerapatan daya (W/L)	10-400	1500-10.000	80-600	100.000+
Energi spesifik (Wh/kg)	25-50	75-200	50-75	0.05-15
Daya spesifik (W/kg)	75-300	500-2000	150-300	500-10.000
Self-discharge harian (%)	0.1-0.3	0.1-0.3	0-0.6	20-40
Usia hidup (tahun)	5-15	5-15	10-20	10-30
Jumlah usia dalam siklus	500-1000	1000-10.000	2000-2500	100.000+
Biaya kapital energi (USD/kWh)	200-400	600-2500	800-1500	300-2000
Biaya kapital daya (USD/kWh)	300-600	1200-4000	500-1500	100-300

1.4. Rumus-Rumus Dasar dan Hubungan Seri Paralel Sel baterai terhubung seri

Suatu rangkaian sel baterai terhubung seri biasanya disebut *battery string*. Tegangan total suatu *string* baterai sama dengan jumlah total tegangan sel individual. Sedangkan arus dan kapasitas (Ah) *string* baterai sama dengan arus dan kapasitas (Ah) sel individualnya. Gambar 1.12 menunjukkan suatu *string* baterai tersusun dari empat sel baterai diseri. Satu sel individual bertegangan 3,6 V dan berkapasitas 2,1 Ah.

Maka *string* baterai tersebut memiliki:

- Tegangan nominal sebesar $4 \times 3,6 \text{ V} = 14,4 \text{ V}$.
- Kapasitas (Ah) nominal sama dengan kapasitas sel individual yaitu 2,1 Ah.
- Kapasitas energi nominal (menggunakan nilai tegangan nominal⁴) sebesar $4 \times 3,6 \text{ V} \times 2,1 \text{ Ah} = 30,24 \text{ Wh}$.



Gambar 1.12. Rangkaian seri dari empat sel baterai.

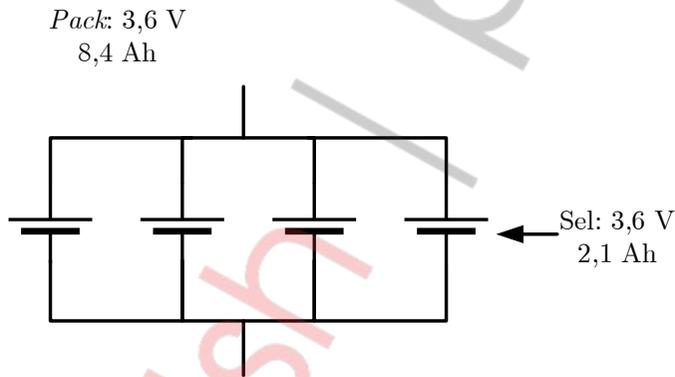
⁴ Lihat kembali subbab “Kapasitas baterai (Ah)” tentang perhitungan energi menggunakan perkalian tegangan nominal dan kapasitas.

Sel baterai terhubung paralel

Jika sel-sel baterai dihubungkan paralel, tegangan baterai sama dengan tegangan sel individual. Namun kapasitas baterai total adalah jumlah total kapasitas sel individual, karena arus baterai adalah jumlah total arus sel individual. Sebagai contoh, Gambar 1.13 menunjukkan empat sel baterai diparalel dengan tegangan dan kapasitas sel individual sebesar 3,6 V dan 2,1 Ah.

Maka baterai paralel tersebut memiliki:

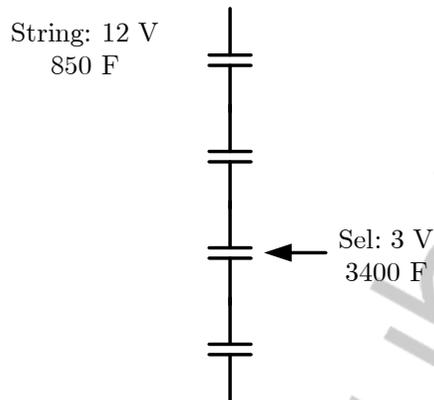
- Tegangan nominal sama dengan tegangan sel individual yaitu 3,6 V.
- Kapasitas (Ah) nominal sebesar $4 \times 2,1 \text{ Ah} = 8,4 \text{ Ah}$.
- Kapasitas energi nominal (menggunakan nilai tegangan nominal⁴) sebesar $4 \times 3,6 \text{ V} \times 2,1 \text{ Ah} = 30,24 \text{ Wh}$.



Gambar 1.13. Rangkaian paralel dari empat sel baterai.

Sel *ultracapacitor* terhubung seri

Jika sel-sel *ultracapacitor* dihubungkan seri, tegangan total *string ultracapacitor* sama dengan jumlah total tegangan sel individual. Sedangkan perhitungan kapasitans totalnya sama seperti perhitungan kapasitans total kapasitor konvensional yang diseri, yaitu $C_{\text{total}} = 1/(1/C_1 + 1/C_2 + \dots + 1/C_n)$ di mana C_{total} adalah kapasitans total rangkaian seri dan C_1, C_2, \dots, C_n adalah nilai kapasitor individual.



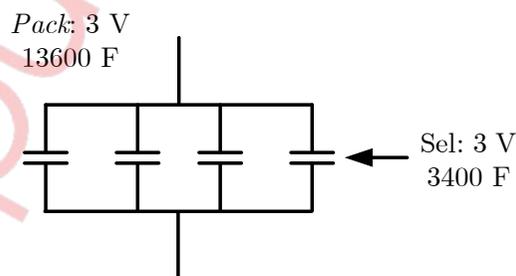
Gambar 1.14. Rangkaian seri dari empat *ultracapacitor*.

Gambar 1.14 menunjukkan rangkaian seri empat *ultracapacitor* dengan tegangan dan kapasitans sel individual adalah 3 V dan 3400 F. Maka *string ultracapacitor* tersebut memiliki:

- Tegangan nominal sebesar $4 \times 3 \text{ V} = 12 \text{ V}$.
- Kapasitans total sebesar 3400 F dibagi 4 = 850 F.
- Energi total yang tersimpan (dalam Joule) sebesar $\frac{1}{2} \times C \times V^2 = \frac{1}{2} \times 850 \text{ F} \times (12 \text{ V})^2 = 61.200 \text{ J} = 17 \text{ Wh}$.

Sel *ultracapacitor* terhubung paralel

Jika sel-sel *ultracapacitor* dihubungkan paralel, tegangan total rangkaian paralel *ultracapacitor* sama dengan tegangan sel individualnya. Sedangkan perhitungan kapasitans totalnya sama seperti perhitungan kapasitans total kapasitor konvensional yang diparalel, yaitu $C_{\text{total}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$) di mana C_{total} adalah kapasitans total rangkaian paralel dan C_1, C_2, \dots, C_n adalah nilai kapasitor individual.



Gambar 1.15. Rangkaian paralel dari empat *ultracapacitor*.

Gambar 1.15 menunjukkan rangkaian paralel empat *ultracapacitor* dengan tegangan dan kapasitans sel individual adalah 3 V dan 3400 F. Maka *pack ultracapacitor* tersebut memiliki:

- Tegangan nominal sama dengan sel individual yaitu 3 V.
- Kapasitans total sebesar $4 \times 3400 \text{ F} = 13600 \text{ F}$.
- Energi total yang tersimpan (dalam Joule) sebesar $\frac{1}{2} \times C \times V^2 = \frac{1}{2} \times 13600 \text{ F} \times (3 \text{ V})^2 = 61.200 \text{ J} = 17 \text{ Wh}$.

BAB 2

PERBEDAAN KARAKTERISTIK BATERAI DAN ULTRACAPACITOR

2.1. Pendahuluan

Material, konstruksi, dan mekanisme penyimpanan energi pada baterai dan *ultracapacitor* memiliki pengaruh besar terhadap karakteristiknya. Pada bab ini, perbedaan karakteristik ini akan dibandingkan, dan bagaimana hubungannya dengan aplikasi yang sesuai untuk keduanya.

2.2. Konstruksi Dasar dan Mekanisme Penyimpanan Energi Baterai

Penyimpanan energi pada sel baterai terjadi melalui reaksi kimia. Bahan atau material yang bereaksi dinamakan “material aktif” (*active material*). Penjelasan mengenai konstruksi dasar sel baterai dan mekanisme penyimpanan energi pada baterai diberikan pada dua subbab berikut, dengan baterai yang dibahas adalah tipe *lead acid* dan lithium-ion.

Konstruksi dasar sel baterai

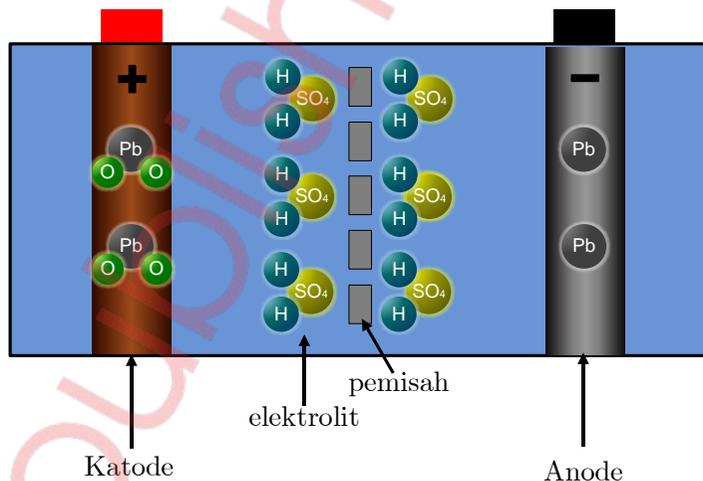
Secara umum terdapat tiga bagian utama pada suatu sel baterai, yaitu elektrode positif, elektrode negatif, dan cairan elektrolit yang merendam elektrode. Terdapat pemisah (*separator*) yang memisahkan elektrode positif dan negatif, namun masih bersifat dapat ditembus (*permeable*). Material aktif biasanya terkandung di dalam elektrode atau bisa juga di dalam elektrolit. Contohnya, pada baterai *lead acid*, elektrolitnya ikut bereaksi dalam reaksi kimia *charge* dan *discharge*. Lain halnya pada baterai lithium-ion, material aktif hanya terkandung pada elektrode, sedangkan elektrolit berfungsi sebagai jalur untuk ion lithium

dapat bergerak dari satu elektrode ke elektrode lawan saat *charge discharge*.

Pada baterai yang mengalami proses *charge*, energi listrik dikonversi melalui reaksi kimia dan disimpan dalam senyawa kimia (*chemical compounds*). Saat proses *discharge*, reaksi kimia yang lain terjadi dan membangkitkan energi listrik.

Secara umum, konstruksi dasar suatu sel baterai elektrokimia terdiri dari elektrode positif, elektrode negatif, dan cairan elektrolit. Istilah lain seperti anode dan katode juga kadang digunakan, walaupun dapat menimbulkan ambigu. Anode baterai adalah elektrode yang melepaskan elektron. Maka, saat proses *discharge*, anode baterai adalah elektrode negatif. Namun, saat proses *charge*, elektrode negatif ini adalah katode baterai. Karena alasan ambiguitas inilah, istilah anode dan katode untuk baterai sekunder selalu mengacu pada proses *discharge* saja.

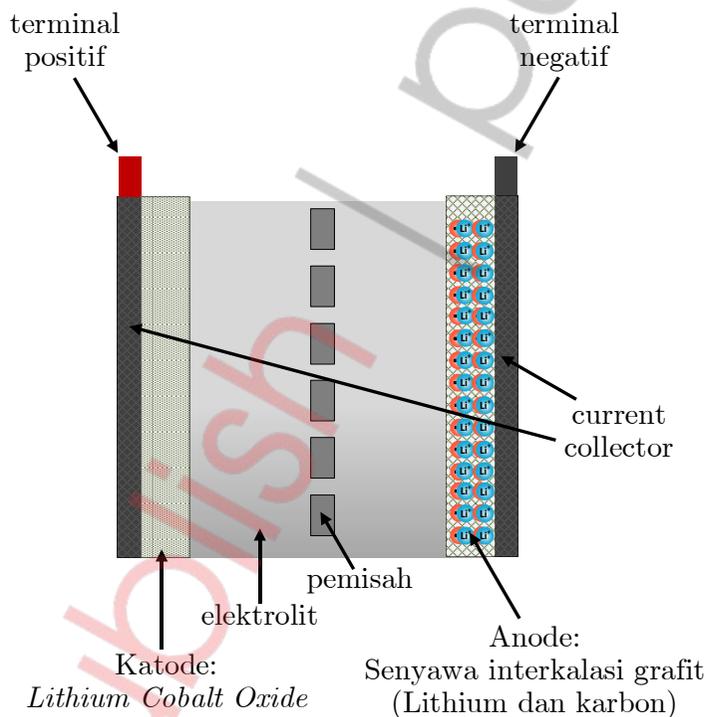
Gambar 2.1 menunjukkan konstruksi sederhana suatu sel baterai *lead acid* sebagai bagian dari aki kendaraan yang ditunjukkan pada Gambar 1.6. Pada kondisi penuh, material pelat negatif adalah timbal (*lead (Pb)*), material pelat positif adalah timbal dioksida (PbO_2), dan larutan elektrolit adalah asam sulfat (H_2SO_4).



Gambar 2.1. Konstruksi sederhana suatu sel baterai *lead acid* dalam kondisi penuh [9]⁵.

⁵ Gambar diadaptasi dari [9], bukan skala sebenarnya.

Gambar 2.2 menunjukkan konstruksi sederhana suatu sel baterai lithium-ion. Elektrode negatif dan positifnya terbuat dari material yang dapat “disisipi” (*intercalate*) ion lithium. “Penyisipan” ini diberi istilah “interkalasi” (*intercalation*). Pada baterai lithium-ion dalam kondisi penuh, ion lithium ini ter-interkalasi atau tersisipkan bersama elektron pada struktur material anode, yang umumnya adalah karbon. Sedangkan material katode pada gambar adalah lithium kobalt oksida (*lithium cobalt oxide* (LiCoO_2)). Terdapat jenis material katode lainnya misalnya *lithium iron phosphate* (LiFePO_4), lithium mangan oksida (*lithium manganese oxide* (LiMn_2O_4)), atau lainnya.



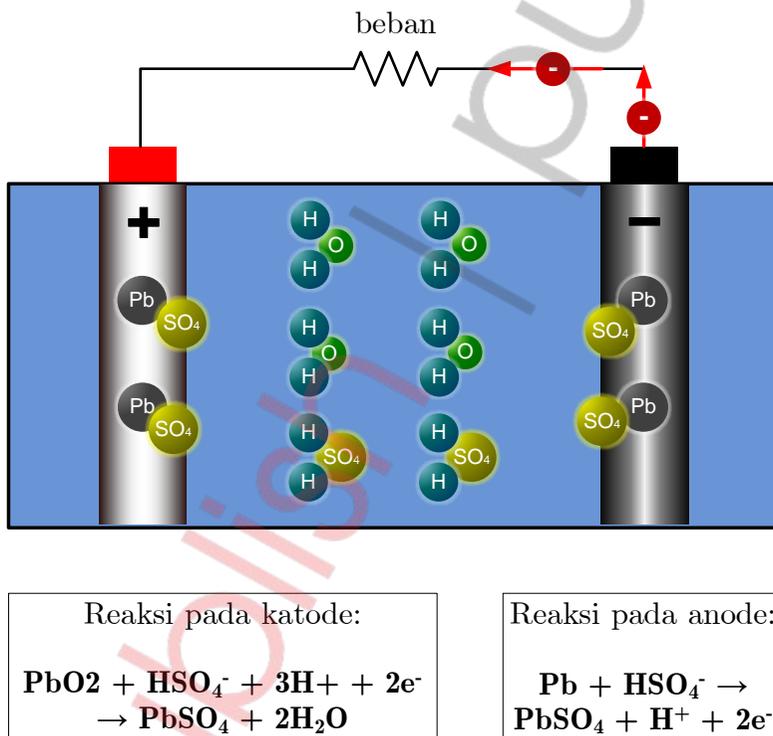
Gambar 2.2. Konstruksi sederhana suatu sel baterai lithium-ion dalam kondisi penuh.

Mekanisme penyimpanan energi pada sel baterai

Pada baterai *lead acid*, saat proses *discharge*, bahan pada elektrode negatif mengalami reaksi oksidasi (melepas elektron), sedangkan elektrode positif mengalami reaksi reduksi (menerima elektron), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3. Jika material aktif telah habis dan tidak

bisa bereaksi lagi, baterai dalam kondisi kosong. Material aktif kini telah bereaksi menjadi timbal sulfat (lead sulfate, PbSO_4).

Jika baterai diisi (*charging*), terjadi reaksi kimia yang berkebalikan dengan reaksi saat *discharge*. Elektron meninggalkan kutub positif dan material timbal sulfat bereaksi kembali menjadi plat timbal dioksida (PbO_2). Elektron mengalir masuk ke kutub negatif material timbal sulfat di kutub negatif bereaksi kembali menjadi dan timbal (Pb). Kondisi baterai kembali terisi seperti pada Gambar 2.1. Reaksi reduksi oksidasi saat proses *charge discharge* ini juga terjadi pada sel baterai dengan material kimia yang lain.



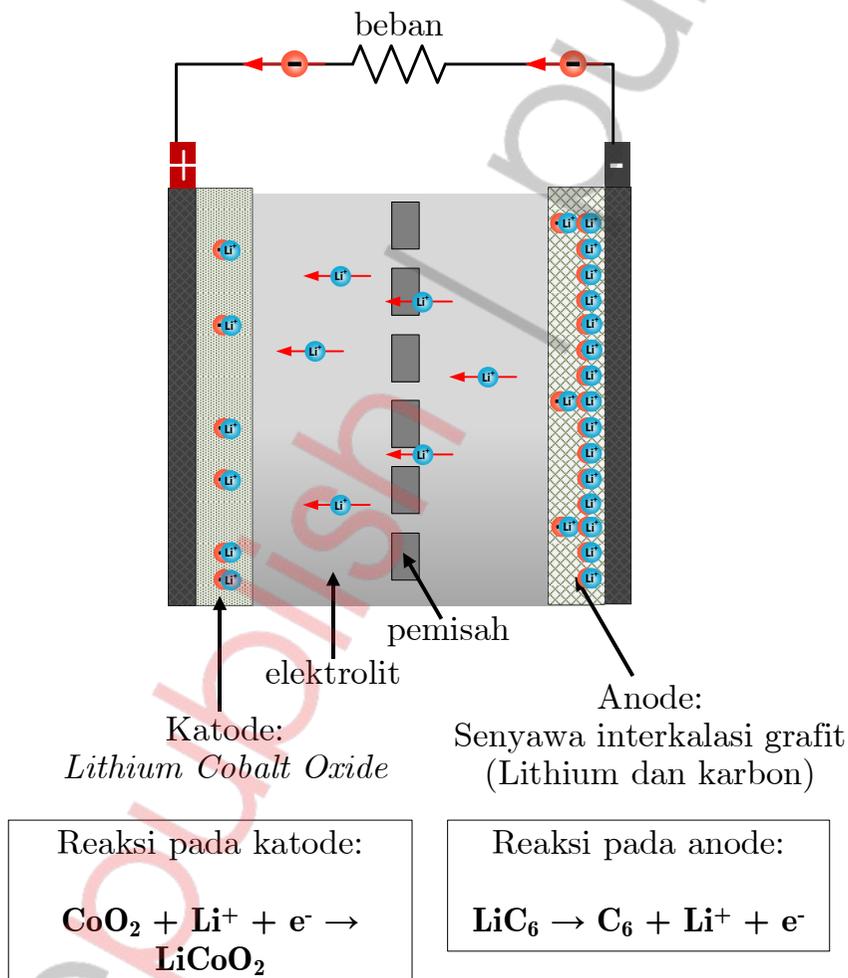
Gambar 2.3. Sel baterai *lead acid* saat *discharge* [9]⁶.

Pada baterai lithium-ion, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4, ion lithium yang ter-interkalasi terlepas dari anode (elektrode negatif) dan bergerak melalui elektrolit menuju katode (elektrode positif). Elektron juga terlepas dari anode dan bergerak melalui penghantar yang

⁶ Gambar diadaptasi dari [9], bukan skala sebenarnya.

terhubung ke beban. Di katode, ion lithium kembali ter-interkalasi di katode bersama dengan elektron yang tadi mengalir dari anode ke katode.

Jika baterai diisi (*charging*), ion lithium yang telah ter-interkalasi di elektrode positif akan kembali bergerak menuju elektrode negatif, bersamaan dengan aliran elektron dari elektrode positif menuju elektrode negatif. Ion lithium dan elektron ini akan kembali terikat di elektrode negatif.



Gambar 2.4. Sel baterai lithium-ion saat *discharge*.

Jenis material kimia sel baterai

Bahan kimia yang digunakan pada sel baterai akan menentukan karakteristik baterai tersebut. Tabel 2.1 menunjukkan beberapa jenis baterai dengan bahan kimia yang umum dijumpai beserta nilai beberapa parameternya.

Tabel 2.1. Material penyusun dan spesifikasi beberapa jenis sel baterai

No.	Jenis baterai	Material elektrode		Elektrolit	Tegangan nominal (V)	Energi spesifik (Wh/kg)
		Positif	Negatif			
Baterai primer						
1.	Alkaline	MnO ₂	Zn	Cairan alkaline	1,5	110-163
2.	Carbon Zinc	MnO ₂	Zn	Cairan asam	1,5	36
Baterai sekunder						
3.	Lead Acid	PbO ₂	Pb	H ₂ SO ₄	2	20-50
4.	Nickel Cadmium	NiOOH	Cd	KOH	1,2	20-55
5.	Nickel Metal Hydride	NiOOH	H ₂ (dalam metal hydride)	KOH	1,2	50-80
6.	Lithium Ion	Li _(1-x) CoO ₂	Li _x C	Garam lithium dalam larutan organik	3,6	100

2.3. Konstruksi Dasar Mekanisme Penyimpanan Energi Ultracapacitor

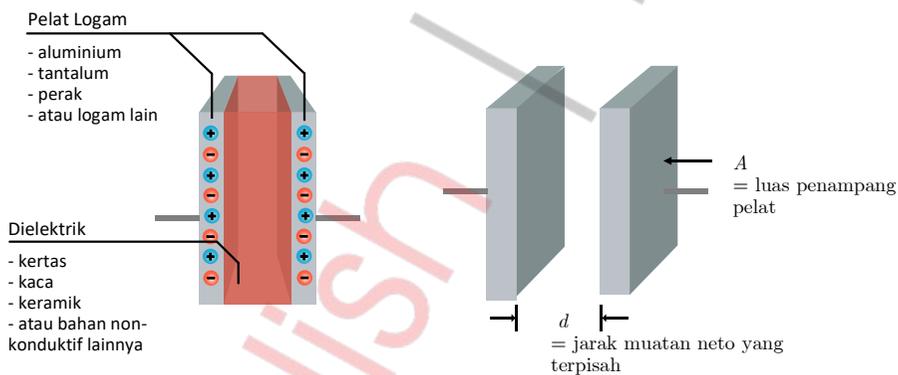
Pada Bab 1 telah dijelaskan mengenai istilah kapasitor konvensional yang berhubungan dengan nilai kapasitansnya yang bernilai di bawah 1 F. Pada subbab ini, akan dijelaskan perbedaan antara kapasitor konvensional dengan *ultracapacitor*.

Kapasitor konvensional

Gambar 2.5 menunjukkan konstruksi dasar suatu kapasitor konvensional berupa sepasang pelat konduktor atau logam yang sejajar. Pada umumnya, sepasang pelat konduktor ini dipisahkan (diisolasi) oleh suatu area yang tidak konduktif, misalnya vakum atau suatu bahan

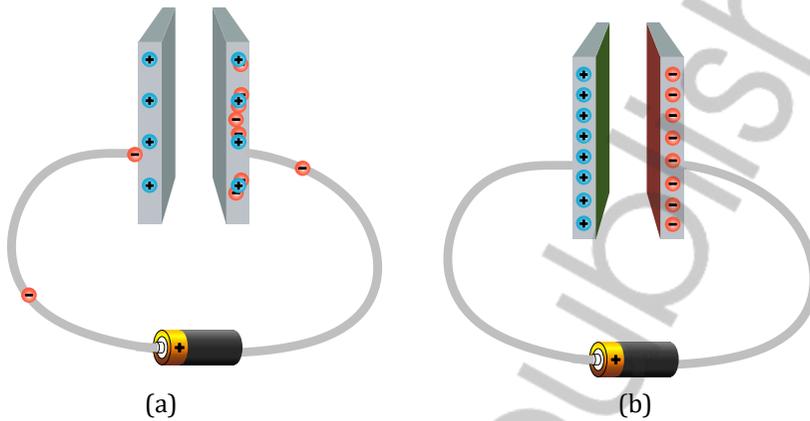
dielektrik. Pada gambar dapat kita lihat kapasitor pada kondisi kosong, dengan jumlah muatan positif dan negatif yang sama pada kedua pelat logam.

Gambar 2.6 menunjukkan suatu kapasitor pelat logam (tanpa dielektrik) yang mengalami proses pengisian hingga terisi penuh. Saat kapasitor dihubungkan dengan sumber tegangan, maka muatan negatif akan mengalir dari pelat yang terhubung ke kutub positif sumber menuju ke pelat yang terhubung ke kutub negatif sumber. Hal tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.6 (a). Pelat tersebut akan memiliki muatan neto negatif, sedangkan pelat yang lain akan memiliki muatan neto positif, seperti terlihat pada Gambar 2.6 (b). Inilah mekanisme penyimpanan energi pada kapasitor, yaitu dalam bentuk energi potensial listrik, yang berhubungan dengan medan listrik di antara pasangan muatan berlawanan yang terpisah tersebut.



Gambar 2.5. Konstruksi kapasitor pelat sejajar dan posisi muatan saat kapasitor tidak terisi [10]⁷.

⁷ Gambar diadaptasi dari [10].



Gambar 2.6. Kapasitor pelat sejajar tanpa dielektrik: (a) mengalami pengisian. (b) telah terisi [10]⁸.

Jika pelat memiliki luas penampang yang lebih besar nilainya, maka akan ada lebih banyak muatan negatif yang dapat ditolak atau didorong dari pelat pertama ke pelat kedua, yang berarti kapasitas kapasitor, atau kapasitansnya juga lebih besar. Begitu juga jika jarak antar pelat diperkecil, dengan gaya yang sama, akan ada lebih banyak muatan negatif yang dapat ditolak ke pelat kedua. Maka kapasitans suatu kapasitor, C , sebanding dengan luas penampang pelatnya, A , dan berbanding terbalik dengan jarak antara muatan yang terpisah (jarak antara pelat), d . Kapasitans suatu kapasitor juga bergantung pada material yang mengisolasi kedua pelatnya, yaitu pada parameter ϵ , permitivitas absolut material tersebut.

Hubungan ketiganya dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.1)$$

dengan ϵ diukur dalam Farad per meter, C diukur dalam Farad, A dalam m^2 , dan d dalam meter.

⁸ Gambar diadaptasi dari [10].

Ultracapacitor

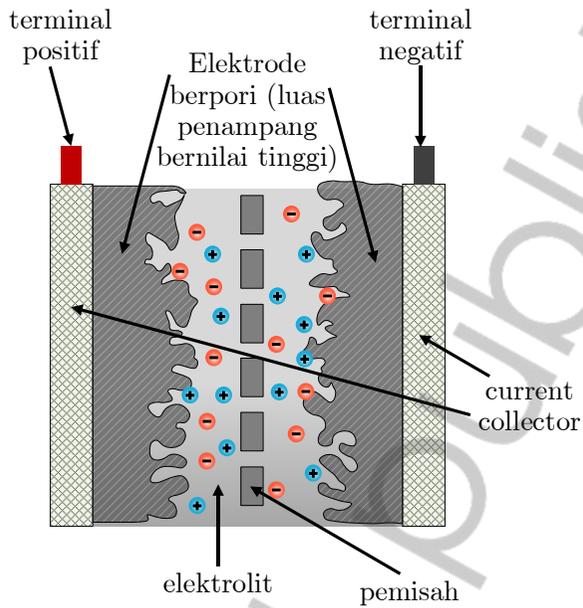
Pembahasan mengenai konstruksi *ultracapacitor* akan kita awali dengan pertanyaan: mengapa *ultracapacitor* memiliki nilai kapasitans yang sangat besar, hingga dapat mencapai puluhan ribu Farad?

Mengingat kembali persamaan (2.1), *ultracapacitor* memiliki nilai luas penampang yang sangat besar serta jarak antara muatan yang sangat kecil. Hal ini disebabkan oleh konstruksi dan materialnya yang berbeda dengan kapasitor konvensional.

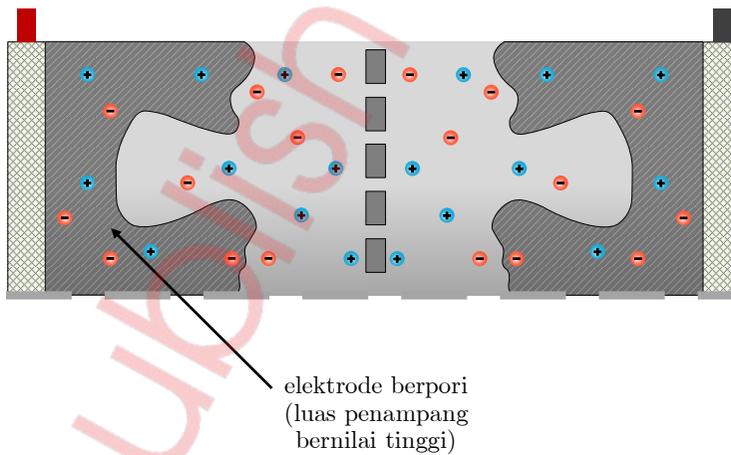
Suatu sel *ultracapacitor* dibangun oleh sepasang elektrode yang terbuat dari material berpori-pori, yang dipisahkan oleh suatu pemisah (*separator*) yang dapat ditembus oleh muatan, di dalam suatu larutan elektrolit. Seperti tampak pada Gambar 2.7, terdapat muatan-muatan positif maupun negatif tersebar pada elektrolit. Ilustrasi yang lebih detail ditunjukkan pada Gambar 2.8 (a). Karena elektrode *ultracapacitor* berpori-pori, luas areanya bernilai sangat tinggi.

Jika *ultracapacitor* ini dihubungkan dengan sumber tegangan, pada elektrode yang positif, muatan-muatan negatif akan terkumpul mendekati muatan-muatan positif pada elektrode, seperti tampak pada Gambar 2.8 (b). Pada elektrode yang negatif, muatan-muatan positif pada elektrolit akan terkumpul mendekati muatan-muatan negatif pada elektrode, dan sebaliknya pada elektrode positif. Pada medan listrik yang mempertahankan pasangan muatan di elektrode dan elektrolit inilah energi potensial listrik disimpan.

Istilah "*double layer*" sendiri mengacu pada dua lapisan muatan yang berlawanan ini, dan dari sinilah asal nama *electric double layer capacitor* atau EDLC, nama lain *ultracapacitor*.

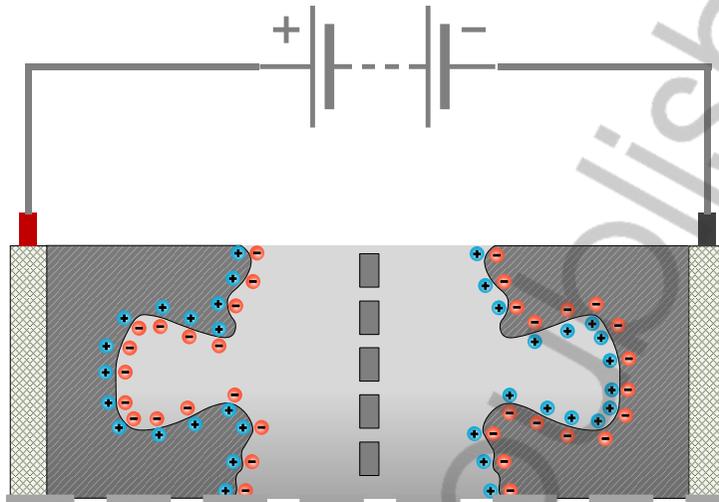


Gambar 2.7. Konstruksi dasar suatu sel *ultracapacitor* dan posisi muatan saat kapasitor belum terisi⁹.



Gambar 2.8. Gambar potongan yang diperbesar: Elektrode, elektrolit, dan muatan saat *ultracapacitor* belum terisi⁹.

⁹ Bukan skala sebenarnya.



Gambar 2.9. Gambar potongan yang diperbesar: Elektrode, elektrolit, dan muatan saat *ultracapacitor* sudah terisi⁹.

Jika kita mengingat kembali persamaan (2.1), dengan d adalah jarak antara muatan yang terpisah, maka dapat kita lihat bahwa *ultracapacitor* memiliki nilai d yang sangat kecil, karena muatan-muatan positif dan negatif hanya terpisahkan oleh perbatasan (*interface*) elektrode dan elektrolit. Sedangkan pori-pori pada elektrode *ultracapacitor* berarti nilai luasan A elektrode tersebut sangat tinggi. Dengan nilai A yang tinggi dan nilai d yang kecil, kapasitansya akan bernilai besar, dan inilah jawaban mengapa *ultracapacitor* memiliki nilai kapasitans yang sangat tinggi dibandingkan dengan kapasitor konvensional.

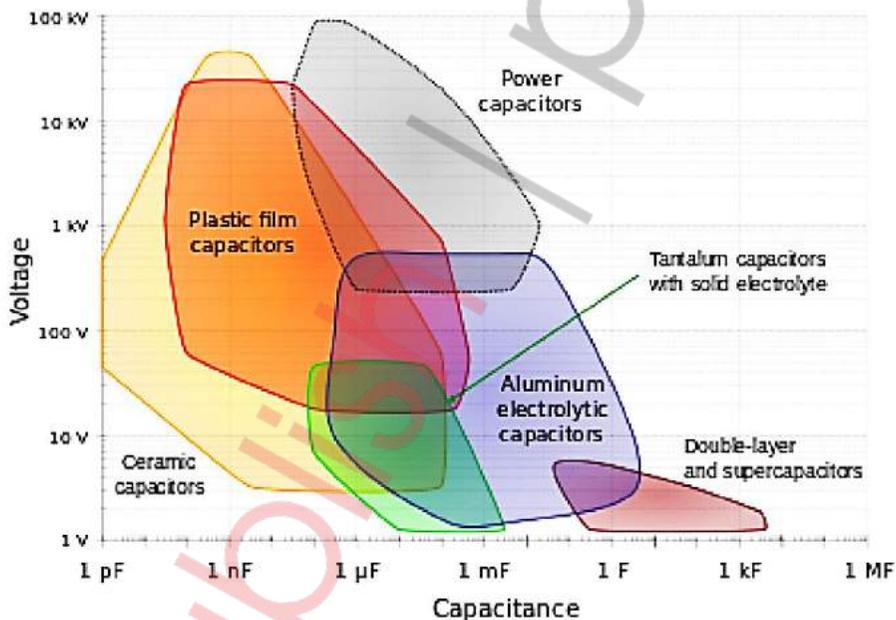
Perbedaan *ultracapacitor* dengan kapasitor konvensional

Di Bab 1 telah kita lihat sekilas perbedaan paling mencolok antara *ultracapacitor* dengan kapasitor konvensional, yaitu nilai kapasitans *ultracapacitor* yang sangat tinggi dibandingkan kapasitor konvensional. Subbab ini akan menampilkan pembahasan yang lebih detail mengenai perbedaan-perbedaan lain dari keduanya.

Tegangan

Anda mungkin telah akrab dengan kapasitor konvensional dan mengetahui rentang level tegangan kerjanya, yaitu mulai dari beberapa

Volt sampai dengan ratusan Volt, seperti kapasitor untuk aplikasi tegangan tinggi. Lain halnya dengan *ultracapacitor* yang memiliki level tegangan kerja jauh lebih rendah, di kisaran 2,7 V. Rentang tegangan dan kapasitans berbagai tipe kapasitor ditunjukkan pada Gambar 2.10. Pada kapasitor konvensional, tegangan kerjanya dibatasi oleh kekuatan dielektriknya. Pada *ultracapacitor*, tegangan kerjanya dibatasi oleh rentang tegangan kerja elektrolitnya, yang bernilai relatif rendah di kisaran 2,7 V sampai sekitar 4 V. Gambar 2.11 menunjukkan dua buah kapasitor yang berukuran hampir sama, namun parameter kelistrikkannya jauh berbeda, yaitu *ultracapacitor* 350 F 2,5 V dan kapasitor elektrolit aluminium 0,047 F 25 V.



Gambar 2.10. Ilustrasi rentang tegangan dan kapasitans untuk bermacam-macam tipe kapasitor [11]¹⁰.

¹⁰ Gambar dari [11] dengan lisensi CC BY 4.0.



Gambar 2.11. Kiri: *ultracapacitor* 350 F 2,5 V berdiameter 3,2 cm. Kanan: kapasitor elektrolit aluminium 0,047 F 25 V [1]¹¹

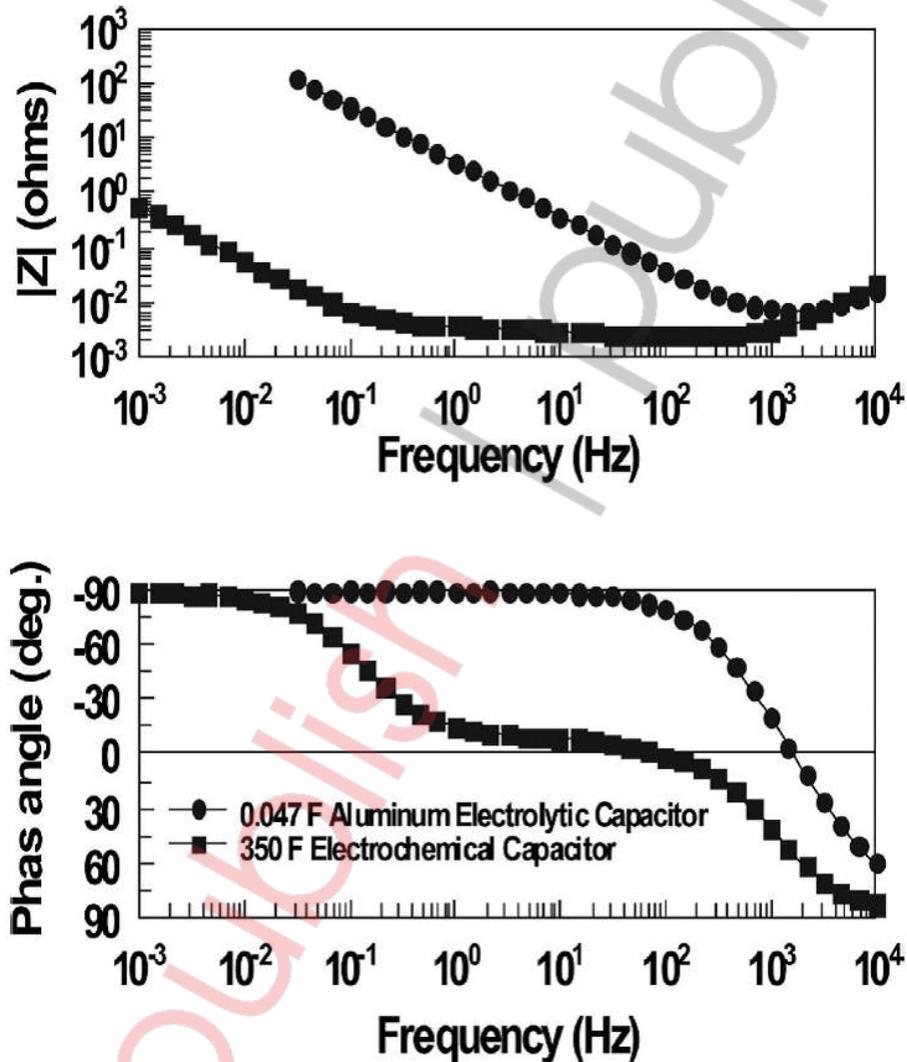
Respons waktu dan frekuensi kerja

Salah satu karakteristik kapasitor adalah respons waktu atau konstanta waktunya (*time constant*). Untuk suatu rangkaian RC seri, yang dapat merepresentasikan suatu kapasitor, konstanta waktu dirumuskan sebagai perkalian R dan C. Dengan mengasumsikan bahwa *ultracapacitor* dapat direpresentasikan oleh rangkaian RC seri, kita akan memperoleh nilai konstanta waktu yang lebih tinggi (dalam orde detik) dibandingkan dengan kapasitor konvensional (dalam orde mikrodetik atau milidetik). Maka, frekuensi kerja *ultracapacitor* akan bernilai lebih rendah dibandingkan dengan kapasitor konvensional. Hal ini menyebabkan *ultracapacitor* tidak sesuai digunakan untuk aplikasi umum kapasitor konvensional, seperti untuk filter riak frekuensi tinggi.

Gambar 2.12 menunjukkan perbandingan respons frekuensi kedua kapasitor dari Gambar 2.11, yaitu kapasitor elektrolit aluminium dan *ultracapacitor* (yang disebut dengan istilah "*electrochemical capacitor*" pada diagram tersebut). Jika kita perhatikan, karakteristik *ultracapacitor* sebenarnya mirip dengan kapasitor konvensional, namun frekuensi terkait karakteristik ini berbeda. Contohnya, kapasitor memiliki karakteristik kapasitif murni (sudut fase berkisar di -90°) pada rentang frekuensi kerjanya; lalu pada frekuensi *self-resonant* (frekuensi resonansi

¹¹ Gambar dari [1] dan direproduksi dengan seizin IEEE.

sendiri) impedansi kapasitor paling minimum karena karakter induktifnya mulai muncul, dan pada frekuensi di atas frekuensi *self-resonant*, karakteristiknya menjadi seperti induktif murni (sudut fase berkisar di 90°).



Gambar 2.12. Diagram Bode perbandingan respons frekuensi kapasitor konvensional dan *ultracapacitor* [1]¹². Atas: magnitudo impedansi versus frekuensi. Bawah: sudut fase versus frekuensi.

¹² Gambar dari [1] dan direproduksi dengan seizin IEEE.

Pada diagram tampak bahwa karakteristik kapasitif murni kapasitor konvensional 0,047 F muncul pada rentang frekuensi sekitar 1 Hz sampai 500 Hz, sedangkan *ultracapacitor* 350 F bersifat kapasitif murni pada rentang frekuensi sekitar 0,001 Hz sampai 1 Hz.

Dari diskusi ini kita dapat mengambil kesimpulan, bahwa *ultracapacitor* sebenarnya sesuai untuk aplikasi *filtering* (seperti kapasitor konvensional), namun dengan frekuensi kerja yang jauh lebih rendah. Contoh aplikasi ini antara lain adalah untuk memperlhalus daya (*power smoothing*) luaran sistem PV atau tenaga angin. Contoh detail aplikasi *ultracapacitor* akan dipaparkan di subbab 2.5.

Rangkaian ekuivalen

Perbedaan konstruksi dan mekanisme penyimpanan energi yang berbeda menjadi alasan perbedaan pemodelan kapasitor konvensional dan *ultracapacitor*. Kapasitor konvensional dapat dimodelkan dengan akurat menggunakan rangkaian ekuivalen yang terdiri dari RC seri. Sebaliknya, karena mekanisme penyimpanan energi pada *ultracapacitor* melibatkan distribusi muatan ke pori-pori beraneka ukuran di elektrode, tidak cukup hanya ada satu nilai resistans dan kapasitans yang dapat mewakili konstruksi dan mekanisme tersebut. Penjelasan detail mengenai pemodelan dan rangkaian ekuivalen *ultracapacitor* dapat dibaca di Bab 3.

2.4. Perbedaan Karakteristik Baterai dan Ultracapacitor

Kita telah melihat perbedaan utama material serta mekanisme penyimpanan energi pada baterai dan *ultracapacitor*. Proses penyimpanan energi pada baterai melibatkan reaksi kimia, sedangkan *ultracapacitor* menyimpan energi secara fisik. Hal ini sangat berpengaruh pada kondisi kedua penyimpan energi tersebut saat kosong maupun terisi. Ada perubahan fisis yang dialami oleh baterai pada kondisi terisi (*charged*) maupun kosong (*discharged*). Sedangkan *ultracapacitor* relatif tidak mengalami perubahan fisis pada perubahan kondisi *charged-discharged*.

Perbedaan mekanisme penyimpanan energi inilah yang menyebabkan perbedaan karakteristik antara baterai dan *ultracapacitor*. Setidaknya, ada tiga karakteristik berbeda antara keduanya yang disebabkan oleh perbedaan mekanisme tersebut: kecepatan *charge*

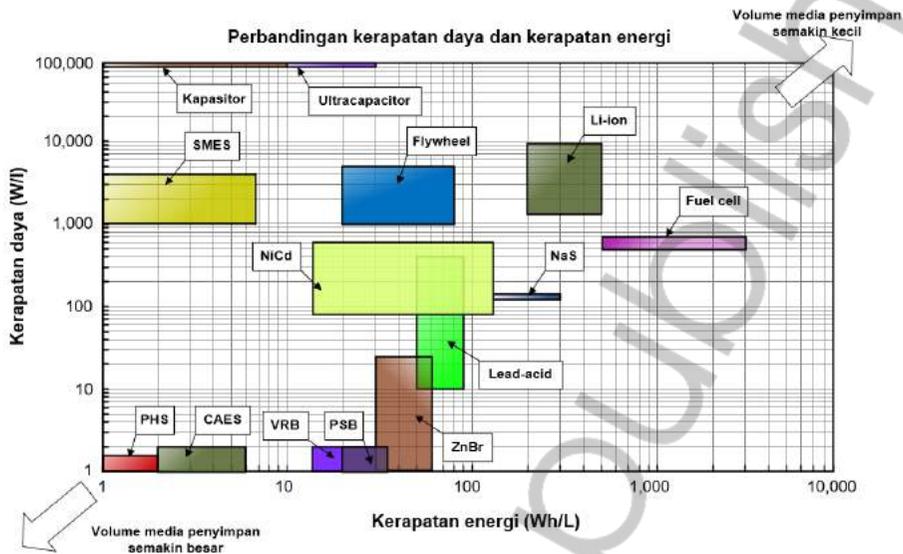
discharge, usia kerja atau *cycle life*, dan risiko termal [12], dan masing-masing akan dibahas pada subbab berikut.

Kerapatan daya dan kerapatan energi

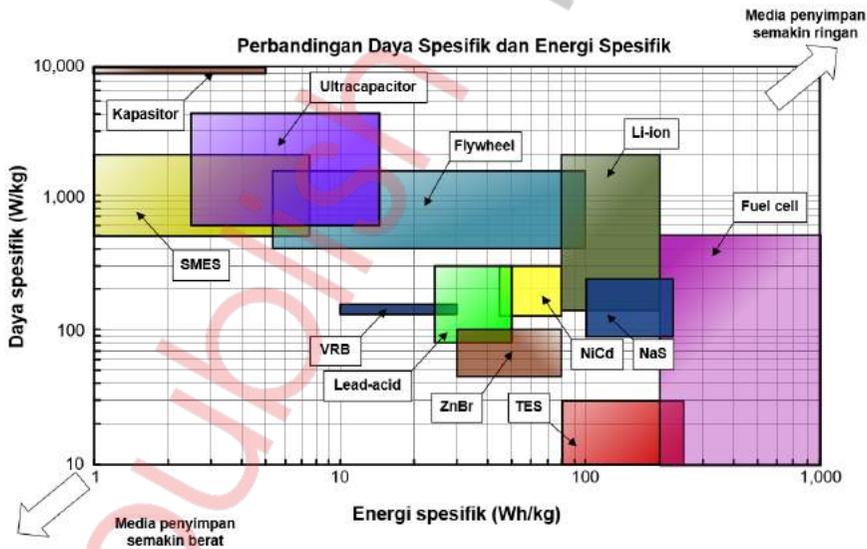
Kerapatan energi maupun kerapatan daya mempermudah kita untuk membandingkan penyimpanan energi yang berbeda, karena memperhitungkan berat atau volume penyimpan energinya. Sebagai contoh, baterai LithiumWerks 26650 [5] memiliki daya spesifik sebesar 2600 W/kg, sedangkan *ultracapacitor* Maxwell BCAP0150 [13] memiliki daya spesifik tipikal sebesar 5700 W/kg. Maka untuk suatu kebutuhan daya maksimal tertentu, dapat diperkirakan bahwa untuk memenuhinya, berat total *ultracapacitor* Maxwell lebih ringan daripada solusi dengan baterai LithiumWerks. Demikian juga jika kita membandingkan energi spesifik penyimpan energi berbeda.

Plot Ragone adalah suatu plot yang menggambarkan posisi berbagai penyimpanan energi berbeda berdasarkan kerapatan energi dan kerapatan dayanya. Gambar 2.13 menunjukkan posisi penyimpan energi yang berbeda pada plot Ragone berdasarkan kerapatan energi dan kerapatan daya volumetriknya. Sedangkan Gambar 2.14 menunjukkan posisi penyimpan energi yang berbeda pada plot Ragone berdasarkan energi dan daya spesifiknya.

Analogi wadah air dapat digunakan untuk memahami konsep kerapatan daya dan energi atau daya dan energi spesifik. Gambar 2.15 menunjukkan analogi wadah air untuk *ultracapacitor* (gambar kiri) dan baterai (gambar kanan). Kapasitas wadah air merepresentasikan kerapatan energi, sedangkan lubang keluar masuk air merepresentasikan kerapatan daya. *Ultracapacitor* memiliki kerapatan energi (kapasitas wadah air) yang lebih kecil daripada baterai. Akan tetapi, kerapatan daya (lubang untuk keluar-masuk air) lebih besar. Sehingga dalam waktu singkat *ultracapacitor* dapat mengeluarkan ataupun memasukkan daya (air) dalam jumlah yang besar.



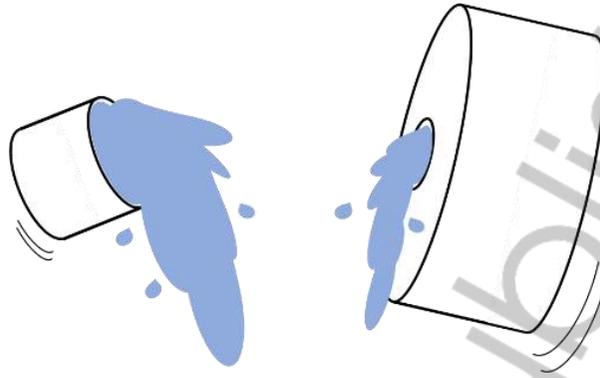
Gambar 2.13. Perbandingan kerapatan energi dan kerapatan daya volumetrik penyimpanan energi berbeda [8]¹³.



Gambar 2.14. Perbandingan energi spesifik dan daya spesifik penyimpanan energi berbeda [8]¹⁴.

¹³ Diadaptasi dari [8] (lisensi CC BY 3.0).

¹⁴ Diadaptasi dari [8] (lisensi CC BY 3.0).



Gambar 2.15. Analogi wadah dan lubang air untuk menggambarkan kerapatan energi dan kerapatan daya *ultracapacitor* (kiri) dan baterai (kanan) [14].

Sebaliknya, pada gambar tampak bahwa baterai memiliki kapasitas wadah air yang lebih besar, yang berarti kerapatannya lebih besar. Akan tetapi jumlah air yang dikeluarkan pada suatu waktu lebih sedikit, yang berarti pada suatu waktu, besar daya *charge* atau *discharge*-nya lebih kecil daripada *ultracapacitor*. Perbedaan karakteristik ini menyebabkan baterai maupun *ultracapacitor* sesuai untuk jenis aplikasi yang juga berbeda, dan pembahasan mengenai hal ini akan diberikan pada subbab 2.5

Kecepatan serta sifat simetri *rate charge discharge*

Kecepatan *charge discharge* pada *ultracapacitor* berkisar pada orde detik atau bahkan kurang dari itu. Energi dapat disimpan pada atau dilepaskan dari *ultracapacitor* dalam durasi singkat tersebut. Sedangkan baterai, untuk ukuran atau dimensi yang kurang lebih sama, membutuhkan waktu beberapa menit untuk *charge* atau *discharge*.

Ultracapacitor juga dapat *discharge* dan di-*discharge* dengan laju (*rate*) yang sama. Sebagai contoh, pada *datasheet ultracapacitor* Maxwell 3 F 3400 F di Gambar 1.11, tercantum nilai arus kontinu maksimum sebesar 225 A dan arus puncak (*peak*) maksimum sebesar 2800 A. Nilai maksimum ini berlaku untuk kondisi *discharge* maupun *charge*.

Sebaliknya, baterai umumnya memiliki *rate* yang berbeda untuk *discharge* dan *charge*. Pada umumnya *rate charge* baterai lebih rendah daripada *rate discharge*-nya. Sebagai contoh, pada *datasheet* baterai LithiumWerks ANR26650M1B di Gambar 1.8, tercantum nilai arus

discharge kontinu maksimum sebesar 50 A, sedangkan nilai arus *charge* kontinu maksimumnya sebesar 10 A. Perbedaan nilai arus *peak* maksimum *discharge* dan *charge* juga berbeda, yaitu 120 A untuk *discharge*, dan 20 A untuk *charge*.

Usia kerja atau *cycle life*

Karena baterai menyimpan energi secara kimiawi melalui reaksi redoks, terdapat perubahan fisis yang terjadi saat kondisi *charge discharge*. Hal ini menyebabkan pada baterai terjadi degradasi material yang lajunya lebih cepat dibanding *ultracapacitor*, sehingga usia kerjanya lebih pendek daripada *ultracapacitor*, apalagi jika di-*discharge* dengan daya tinggi (*deep discharge*).

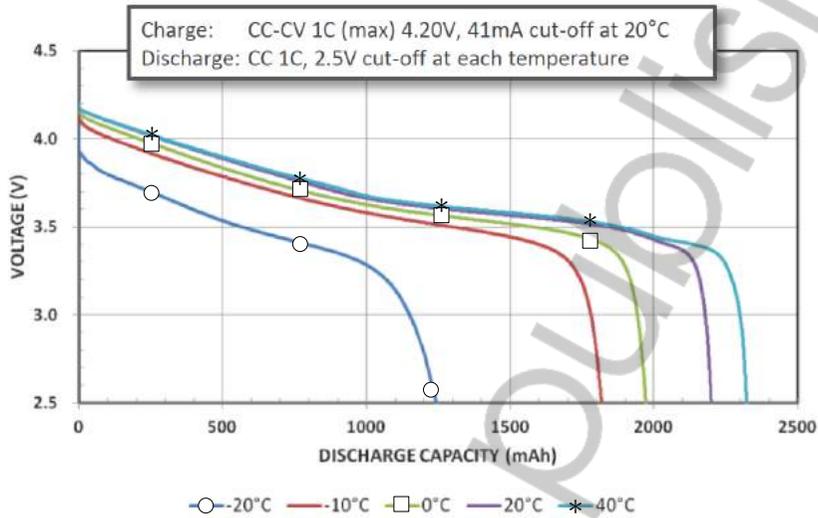
Seperti dapat dilihat pada Tabel 1.1, usia kerja baterai lithium-ion secara umum dapat mencapai 10.000 siklus, sedangkan *ultracapacitor* dapat mencapai 100.000 bahkan sampai lebih dari 500.000 siklus.

Pengaruh temperatur dan aspek termal

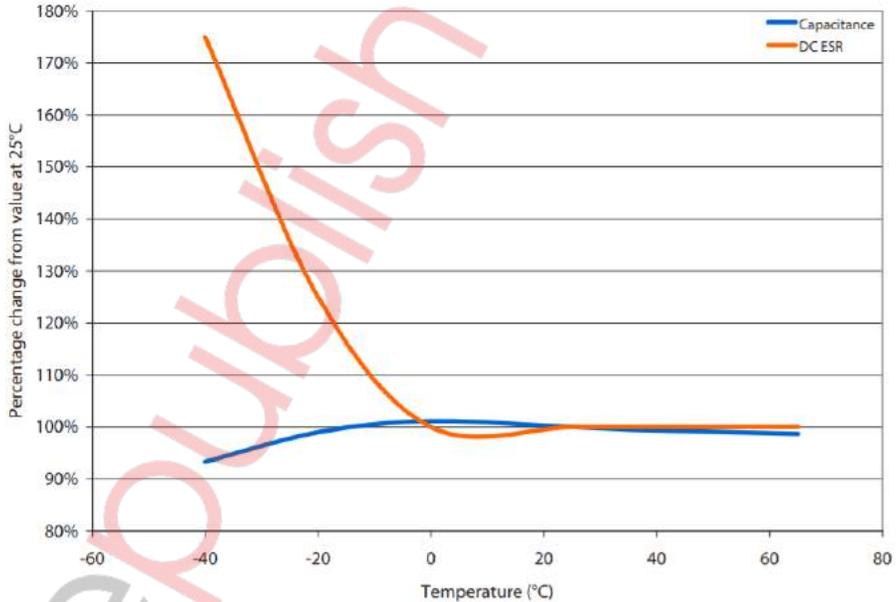
Karena baterai melibatkan reaksi kimia, baterai menjadi sangat terpengaruh oleh temperatur. Temperatur yang terlalu rendah dapat menghambat reaksi kimia baterai hingga kapasitas yang dapat digunakan menjadi lebih kecil daripada kapasitas nominalnya. Pada temperatur lebih rendah daripada $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, baterai dapat tidak berfungsi. Di negara empat musim umum digunakan penghangat baterai saat temperatur sekitar terlalu rendah. Temperatur kerja baterai dibatasi pada nilai -20 hingga $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada *ultracapacitor*, temperatur kerja terendahnya dapat mencapai -40 sampai $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ sehingga keunggulan ini membuat *ultracapacitor* menjadi alternatif untuk aplikasi di kutub maupun luar angkasa.

Gambar 2.16 dan Gambar 2.17 menunjukkan contoh grafik pengaruh temperatur terhadap kapasitas baterai lithium-ion dan *ultracapacitor*. Dari gambar pertama dapat kita lihat bahwa pada temperatur $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ kapasitas baterai dapat turun menjadi sekitar 50% kapasitas nominalnya. Sebaliknya, dari gambar kedua dapat kita lihat bahwa kapasitas *ultracapacitor* tidak berubah dalam pengaruh temperatur yang berbeda.

Discharge Characteristics (by temperature)



Gambar 2.16. Cuplikan *datasheet* Panasonic Li-ion UR18650A [6]: perubahan kapasitas *discharge* baterai akibat perubahan temperatur.



Gambar 2.17. Cuplikan *datasheet* Maxwell *ultracapacitor* BCAP0310 dan BCAP0350 [15]: perubahan kapasitans dan resistans *ultracapacitor* akibat perubahan temperatur.

Temperatur operasi yang terlalu tinggi dalam waktu yang lama juga dapat mengurangi kapasitas dan usia baterai dan *ultracapacitor*. Pada umumnya temperatur kerja maksimal baterai dibatasi pada nilai 60 °C dan beberapa aplikasi khusus hingga 80 °C (Li-ion), 65 °C (NiCd, NiMH), dan 50 °C (*lead acid*), sedangkan untuk *ultracapacitor* nilainya berkisar pada 65 sampai 70 °C, dan beberapa jenis mencapai nilai 85 °C [16].

Karena perbedaan material dan struktur pula, baterai memiliki risiko termal yang jauh lebih tinggi daripada *ultracapacitor*. Suatu kondisi temperatur tinggi, misalnya disebabkan oleh temperatur lingkungan, atau baterai mengalami *overcharge*, atau terpicu oleh hubung singkat internal, dapat memicu terjadinya *thermal runaway*. *Thermal runaway* adalah kondisi di mana temperatur baterai akan terus naik karena kondisi ini memicu reaksi kimia abnormal yang juga bersifat eksotermik (menghasilkan panas), sehingga terjadi umpan balik positif yang terus menaikkan temperatur baterai. Hal ini dapat menyebabkan timbulnya api dan ledakan [17].

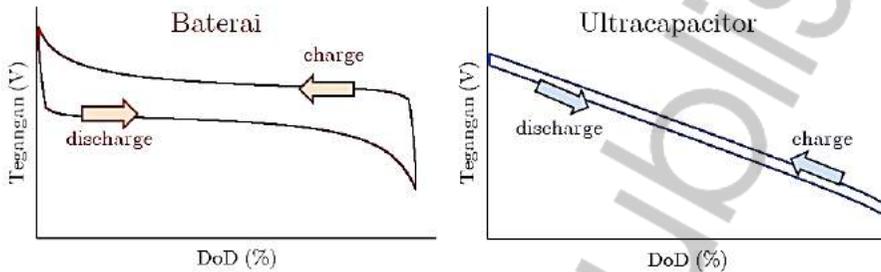
Pada *ultracapacitor*, elektrolitnya sebenarnya juga memiliki risiko timbulnya titik api, namun risiko ini sangat kecil. Selain itu, tidak ada risiko *thermal runaway* seperti baterai karena tidak ada reaksi kimia berantai yang menyebabkan temperatur terus naik.

Karakteristik tegangan versus DoD

Kita telah melihat kurva karakteristik *discharge* baterai di Gambar 1.9 dan Gambar 1.10. Terlihat bahwa saat baterai penuh, tegangannya sedikit lebih tinggi daripada tegangan terminal nominalnya. Lalu saat baterai mulai di-*discharge*, tegangannya turun lalu relatif konstan sampai DoD baterai mencapai sekitar 80%. Setelah itu, tegangan tampak turun dengan signifikan. Karakteristik yang mirip tampak saat baterai di-*charge*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.18 kiri. Ada kenaikan tegangan yang signifikan dari kondisi kosong ke kondisi terisi sekitar 10 sampai 20%, lalu tegangannya relatif konstan sampai kondisi baterai hampir terisi penuh.

Gambar 2.18 kanan menunjukkan kurva tegangan *ultracapacitor* sebagai fungsi DoD. Tegangan *ultracapacitor*, seperti halnya kapasitor konvensional, akan mengalami penurunan secara proporsional dengan

muatan yang dikeluarkan saat *discharge*, serta kenaikan yang proporsional dengan muatan yang diisi saat *charge*.



Gambar 2.18. Kurva tegangan versus DoD pada baterai (kiri) dan *ultracapacitor* (kanan).

2.5. Contoh Aplikasi *Ultracapacitor*

Di Bab 1 telah diberikan pengenalan singkat dengan *ultracapacitor*, dan di bab ini mekanisme kerja serta karakteristik detail telah diberikan. Setelah kita memahami hal-hal tersebut, marilah kita lihat beberapa contoh aplikasi tertentu yang memanfaatkan *ultracapacitor*. Contoh-contoh di bawah adalah contoh aplikasi yang telah beroperasi secara komersial, juga aplikasi yang bersifat konsep atau masih dalam penelitian. Karena penggunaan baterai telah menjadi hal yang umum, maka bab ini hanya akan memberikan contoh aplikasi *ultracapacitor*.

Pengereman regeneratif

Saat kendaraan yang bergerak direm atau diperlambat, dengan mekanisme pengereman konvensional (mekanis), ada energi kinetik yang terkonversi menjadi panas yang terbuang. Mekanisme pengereman regeneratif memungkinkan energi kinetik dari pengereman dikonversi untuk dapat dimanfaatkan kembali. Tantangan utamanya terletak pada durasi pengereman: pendek dan cepat. Maka, sistem penyimpan energi untuk aplikasi pengereman regeneratif harus yang memiliki respons waktu yang cepat dan mampu melakukan proses *charging* dengan daya yang besar dan waktu yang singkat.

Karakteristik baterai dengan reaksi kimianya membatasi kemampuan *charging* serta durasinya. Sebaliknya, dengan kerapatan daya yang tinggi dan respons waktu yang cepat, *ultracapacitor* sesuai untuk aplikasi ini. *Cycle life ultracapacitor* yang sangat panjang dan tidak

terpengaruh *rate charge discharge* juga sesuai dengan karakteristik aplikasi pengereman regeneratif ini, yaitu *charge discharge* dalam waktu cepat dan berulang-ulang.

Berdasarkan kesesuaian karakteristik dengan aplikasi inilah, kendaraan Mazda keluaran mulai tahun 2012 menggunakan teknologi yang disebut “i-ELOOP” untuk pengereman regeneratif dengan penyimpanan energi regeneratifnya menggunakan *ultracapacitor* [18], [19].

Ultracapacitor juga banyak dimanfaatkan untuk sistem pengereman regeneratif pada kereta api, trem, derek, forklif, dan sejenisnya.

Sistem akselerasi pada kendaraan

Aplikasi dengan kebutuhan performa tinggi sebagai prioritas utama, misalnya mobil balap, di mana jarak tempuh (*range*) bukan menjadi hal penting, adalah salah satu aplikasi yang sesuai dengan karakteristik *ultracapacitor* yang mampu memberikan daya tinggi dalam waktu singkat. Toyota Hybrid System-Racing (THS-R) telah mengadopsi *ultracapacitor* untuk pengereman regeneratif dan akselerasi karena alasan tersebut [20]. Demikian pula halnya dengan Lamborghini yang merilis Sián [21] di tahun 2019.

Kendaraan transit

Salah satu alasan *ultracapacitor* kurang populer sebagai sumber energi utama kendaraan listrik adalah karena kerapatan energinya yang rendah, sehingga tidak dapat menyediakan energi untuk suatu jarak tempuh yang wajar. Namun, kendaraan transit seperti bus kota, *shuttle bus*, atau trem memiliki suatu rute yang pasti dan sejumlah halte pemberhentian. Kepastian rute ini memudahkan perkiraan kebutuhan energi, dan halte pemberhentian dapat digunakan untuk *charging* dengan cepat, sehingga ada potensi untuk memanfaatkan *ultracapacitor* sebagai sumber energi utama kendaraan transit.

Beberapa lokasi di dunia telah mengoperasikan bus listrik dengan *ultracapacitor* sebagai penyimpan energi tunggal, seperti di Sofia, Bulgaria (jarak rute 11,2 km; *charging* di terminal awal dan akhir; durasi *charging* 5 sampai 6 menit); Graz, Austria (jarak ture 3,5 km; *Charging* di terminal dan *pantograph*; durasi *charging* 0,5 sampai 2 menit); Nice,

Perancis (jarak rute 3,9 km; *charging* setiap berhenti di halte dengan durasi *charge* 20 detik); dan beberapa lokasi di negara lain [14], [22].

Beberapa lokasi di China telah mengoperasikan trem bertenaga *ultracapacitor* saja maupun dikombinasikan dengan baterai atau *fuel cell*. Salah satunya adalah trem dengan *ultracapacitor* 9500 F yang dapat *dicharge* di setiap pemberhentian selama 30 detik [23], [24].

Jaringan listrik (*electrical grid*) dan aplikasi energi terbarukan

Ultracapacitor banyak digunakan untuk merespons sifat *intermittent* (terputus-putus atau tidak kontinu) sumber energi terbarukan seperti tenaga angin dan surya, yang kadang disebut dengan istilah stabilisasi daya (*power stabilization*), "*power smoothing*", atau "*power firming*". Kebutuhan *charge discharge* berdaya besar dan berdurasi singkat ini berdampak negatif terhadap kapasitas, usia dan pemeliharaan baterai, sehingga untuk aplikasi seperti ini, karakteristik *ultracapacitor* lebih sesuai. *Ultracapacitor* juga dapat dikombinasikan dengan baterai untuk menyokong baterai sehingga baterai tidak mengalami fluktuasi permintaan *charge discharge*.

Aplikasi serupa adalah untuk regulasi frekuensi dan stabilisasi daya. Tak hanya di sisi pembangkit ataupun *grid*, *ultracapacitor* juga dapat digunakan di sisi beban, misalnya untuk pemotongan daya puncak (*peak power shaving*). Misalnya, di pelabuhan, operasi derek dapat menyebabkan kedip tegangan (*voltage sag*) terjadi, dan *ultracapacitor* telah digunakan untuk mengatasi masalah ini.

Detail mengenai beberapa contoh yang telah dibahas pada subbab ini dapat dibaca di [25]-[27].

Penyokong daya (*power buffer*) aplikasi berdaya rendah

Contoh-contoh sebelumnya telah menunjukkan bagaimana *ultracapacitor* dapat beroperasi sebagai penyokong atau pembantu suatu sistem. Aplikasi *ultracapacitor* memang banyak digunakan berbarengan dengan sistem lain, misalnya sebagai penyimpan energi yang dihibridisasi dengan baterai. Pada sistem-sistem seperti itu, *ultracapacitor* berfungsi sebagai *power buffer* untuk membantu menyuplai daya sesaat yang tinggi. Contoh aplikasinya sangat beragam, mulai dari aplikasi besar seperti kapal laut sampai aplikasi kecil seperti sensor nirkabel dan *smart meter*. Walaupun berdaya kecil, aplikasi sensor

nirkabel dan *smart meter* membutuhkan daya puncak yang tinggi saat transmisi data, dan *ultracapacitor* dapat membantu baterai menyediakan daya tersebut. Detail contoh aplikasi berdaya kecil dapat dibaca di [28], [29].