

ENERGY STORAGE SYSTEM

**Teori Dan Konsep Dasar
Sistem Penyimpanan Energi**

Penulis :

**Reza Abdu Rahman, Dwi Rahmalina, Yani Kurniawan
Dibyو Setiawan, Rani Anggrainy**

ENERGY STORAGE SYSTEM
TEORI DAN KONSEP DASAR SISTEM PENYIMPANAN ENERGI

Tim Penulis:

**Reza Abdu Rahman, Dwi Rahmalina, Yani Kurniawan,
Dibyo Setiawan, Rani Anggrainy**

Desain Cover:

Usman Taufik

Tata Letak:

Aji Abdullatif R

Proofreader:

N. Rismawati

ISBN:

978-623-6092-80-4

Cetakan Pertama:

Juli, 2021

Hak Cipta 2021, Pada Penulis

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang

Copyright © 2021

by Penerbit Widina Bhakti Persada Bandung

All Right Reserved

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

PENERBIT:

WIDINA BHAKTI PERSADA BANDUNG

(Grup CV. Widina Media Utama)

Komplek Puri Melia Asri Blok C3 No. 17 Desa Bojong Emas
Kec. Solokan Jeruk Kabupaten Bandung, Provinsi Jawa Barat

Anggota IKAPI No. 360/JBA/2020

Website: www.penerbitwidina.com

Instagram: @penerbitwidina

PRAKATA

Berkembangnya perhatian para peneliti global dan nasional terkait dengan krisis energi, membuat pemanfaatan sumber energi baru terbarukan dan perkembangan teknologi ramah lingkungan seperti mobil listrik dikembangkan secara masif. Sebagai sistem yang bekerja secara *intermittent*, sistem energi baru dan terbarukan membutuhkan unit penyimpanan energi. Unit penyimpanan energi juga menjadi isu penting untuk kendaraan listrik berkaitan dengan efisiensi menyeluruh dari kendaraan tersebut dan juga target untuk mencapai harga produksi masal yang relatif murah.

Sistem penyimpanan energi sangat kompleks dan tidak bisa dinilai hanya berdasarkan kapasitas dan harganya saja, namun juga karakteristik dan parameter operasinya harus diperhitungkan secara seksama. Oleh karenanya, tiap karakteristik penyimpanan memiliki pengaruh terhadap performa menyeluruh dari sistem penyimpanan energi, termasuk untuk biaya yang lebih hemat. Buku ini disusun menggunakan pendekatan *practical-deduction* untuk membangun konsep fundamental yang mudah dicerna oleh pembaca.

Memandang kebutuhan literasi yang kuat untuk penguasaan konsep fundamental dari sistem penyimpanan energi, maka tim penyusun membuat buku ini yang dapat digunakan sebagai rujukan penting untuk sistem penyimpanan energi. Kajian yang komprehensif dan terbaru, disusun menggunakan pola deduksi untuk memberikan pemahaman yang konkrit bagi pembaca dan mengacu kepada pendekatan praktis pada kehidupan sehari-hari, membuat pembahasan menjadi lebih mudah ditelaah. Beberapa bagian dibuat seperti *missing pieces*, sehingga memicu rasa penasaran pembaca untuk merujuk pada referensi lain. Buku ini sangat cocok untuk kalangan akademisi, baik dosen dan mahasiswa, serta untuk kalangan praktisi dan bisnis rekayasa energi.

Buku ini tersusun dari 8 Bagian, yang dimulai pada Bagian 1 yang membahas energi dan sistem energi, dilanjut ke Bagian 2 tentang konsep terapan hukum termodinamika pada penyimpanan energi. Setelah pengetahuan tentang energi dan termodinamika terbentuk, Bagian 3 menyajikan tentang sistem penyimpanan energi yang dibedah secara detail berdasarkan metode dan aplikasinya. Bagian 4 menceritakan tentang parameter operasi penyimpanan energi, khususnya untuk *life cycle*, yang menjadi aspek paling penting dari suatu penyimpanan energi.

Setelah prinsip dan konsep dasar diketahui pada Bagian 1 sampai 4, selanjutnya beberapa contoh aplikasi dan model penyimpanan energi dibahas. Bagian 5 menyajikan tentang metode penyimpanan energi secara mekanis. Bagian 6 fokus pada penyimpanan energi secara kimiawi. Penyimpanan energi termal dibahas pada Bagian 7 dan sebagai tambahan, Bagian 8 membahas tentang penyimpanan dan perkembangan produksi hidrogen.

Jakarta, Juli 2021

Tim Penulis

DAFTAR ISI

PRAKATA	iii
DAFTAR ISI	iv
BAB 1 ENERGI DAN SISTEM ENERGI	1
A. Definisi energi.....	1
B. Penggunaan energi.....	4
C. Penyimpanan energi.....	7
BAB 2 TERMODINAMIKA PADA PENYIMPANAN ENERGI	9
A. Hukum termodinamika.....	9
B. Termodinamika dan <i>energy storage</i> (ES)	15
BAB 3 SISTEM PENYIMPANAN ENERGI	23
A. Pengantar penyimpanan energi	23
B. Penyimpanan energi sebagai sistem	24
C. Metode penyimpanan energi.....	28
D. Hibridisasi sistem penyimpanan energi.....	30
BAB 4 PARAMETER OPERASI PENYIMPANAN ENERGI	33
A. Pemahaman tentang parameter operasi penyimpanan energi ..	33
B. Kapasitas.....	36
C. <i>Power</i>	39
D. <i>Efficiency</i>	41
E. <i>Storage period</i>	44
F. <i>Cost</i>	45
G. <i>Charge and discharge time</i>	47
BAB 5 PENYIMPANAN ENERGI MEKANIS	51
A. <i>Pumped storage</i>	51
B. Udara bertekanan (<i>compressed-air</i>)	55
C. <i>Flywheel</i> (roda gila).....	58
BAB 6 PENYIMPANAN ENERGI KIMIAWI	61
A. Baterai <i>electrochemical</i> (kimia–elektrik)	61
B. Karakteristik baterai <i>electrochemical</i>	64
C. Baterai asam timbal.....	65
D. Baterai-baterai kelas paduan nikel (<i>zinc, iron, cadmium</i>)	68
E. Baterai <i>lithium</i>	69

F. Baterai lainnya	70
G. Perkembangan pada baterai	71
H. <i>Thermochemical</i> (kimia–termal)	73
BAB 7 PENYIMPANAN ENERGI TERMAL	77
A. Pengantar penyimpanan energi termal	77
B. Penyimpanan panas sensibel	81
C. Material untuk penyimpanan panas sensibel	82
D. Teknologi penyimpanan panas sensibel	84
E. Penyimpanan panas laten	88
F. Material untuk penyimpanan panas laten	90
BAB 8 PENYIMPANAN HIDROGEN	95
A. Pengantar hidrogen	95
B. Penyimpanan hidrogen melalui gas bertekanan	97
C. Penyimpanan hidrogen cair melalui kriogenik	99
D. Penyimpanan hidrogen padat	99
E. Produksi hidrogen	100
PROFIL PENULIS	109



ENERGI DAN SISTEM ENERGI

A. DEFINISI ENERGI

Energi dalam kehidupan manusia memiliki peranan yang sangat penting. Tidak akan ada kehidupan manusia tanpa adanya energi. Energi mutlak dibutuhkan dalam kehidupan manusia, dari bernafas, bergerak, bahkan saat tidur pun, energi tetap dikonsumsi oleh tubuh manusia. Pada aspek kegiatan manusia, energi digunakan untuk melakukan usaha, kerja dan aktivitas kehidupan manusia lainnya.

Hal terpenting dalam membahas suatu istilah pada bidang teknik adalah memahami definisi istilah tersebut. Energi pada KBBI (Kamus Besar Bahasa Indonesia) didefinisikan sebagai kemampuan untuk melakukan kerja; kekuatan yang dapat digunakan untuk melakukan berbagai proses kegiatan. Pada bidang teknik, energi memiliki definisi yang lebih luas karena terkait dengan cabang keilmuan dasar sains yakni biologi, kimia dan fisika.

Pendekatan definisi energi yang lebih spesifik dan terukur diperlukan untuk memahami definisi energi dalam bidang sains dan teknik. Sebagai contoh, mengacu kepada konsep umum tentang energi yang disebut sebagai “kapasitas dalam melakukan kerja” akan sulit dibuktikan dalam bidang sains karena kata “kerja (*work*)” memiliki definisi sendiri yakni “besarnya gaya dalam jarak tertentu”. Sehingga jika energi hanya disamakan dengan kapasitas melakukan kerja, maka pada satu titik jumlah

energi sama dengan jumlah kerja. Tentunya hal ini tidak mungkin karena mengacu ke hukum kedua termodinamika, sebagian dari energi tidak bisa melakukan kerja yang diharapkan karena adanya kerugian sistem.

Pendekatan energi yang lebih ideal seperti yang dinyatakan oleh Nobel Laureate Richard Feynman. Menurutnya, “energi bukan sesuatu yang dapat didefinisikan dengan jelas, namun lebih sebagai suatu kuantitas yang harus diperhitungkan secara komprehensif menggunakan standar-standar acuan yang spesifik” [1]. Definisi tersebut cukup memberikan penjelasan yang lebih bisa diterima untuk bidang teknik yakni energi sebagai kuantitas. Kuantitas hanya digunakan untuk menyatakan suatu nilai atau kadar, kuantitas tidak dideskripsikan sebagai suatu fungsi yang jelas. Sebagai contoh: kuantitas air pada gelas tersebut 400 ml, kuantitas tersebut tidak menjelaskan air yang ada akan atau dapat digunakan untuk apa.

Pemahaman energi seperti yang dinyatakan oleh Feynman sangat sesuai dengan hukum termodinamika pertama yang menyatakan energi tidak bisa diciptakan atau dimusnahkan, energi hanya bisa diubah dari satu bentuk ke bentuk lain. Pemahaman energi sebagai kuantitas tentunya sangat sesuai dengan kaidah termodinamika tersebut. Hal ini perlu dipahami dengan sangat baik karena pembahasan terkait dengan penyimpanan energi akan sangat erat dengan pemahaman tentang “kuantitas”. Bagaimana nilai energi bisa ditampung, bagaimana cara mengeluarkan nilai energi tersebut dari penampungan, apakah seluruh nilai yang ditampung bisa dikeluarkan dari penyimpanan, dan seterusnya. Lebih lanjut, pemahaman energi ini juga untuk menghindari konsep “*free energy*” atau “*perpetual motion*” yang sangat menyesatkan karena hal ini mutlak bertentangan dengan konsep termodinamika.

Satuan energi menurut SI adalah Joule (J) yang mana nilai ini juga digunakan untuk menyatakan satuan “kerja (*work*)”. Perbedaan yang sangat penting adalah jika energi = 1,000 J, maka tidak bisa dinyatakan sebagai kerja = 1,000 J juga. Pernyataan tersebut berkaitan dengan kerugian-kerugian dalam sistem konversi energi yang merubah energi masukan menjadi kerja (detail pembahasan ini ada pada buku Termodinamika). Pendekatan yang lebih tepat untuk “kerja (*work*)” dengan unit yang disamakan dengan energi (Joule atau J) adalah “*work*

done” atau kerja yang selesai/berhasil dilakukan. Untuk melihat perbedaan yang jelas untuk satuan Joule sebagai “energi”, “kerja (*work*)” dan “kerja selesai (*work done*)” perhatikan dua contoh berikut.

1. Pada kasus sistem termal

“Untuk menaikkan suhu air 1 °C (misalnya dari 30 °C menjadi 31 °C) dengan massa 1 kg, dibutuhkan energi sebesar 4.2 kJ”

Berdasarkan data di atas, maka dengan mudah kita dapat memperhitungkan berapa energi yang dibutuhkan untuk membuat air dengan massa 1 kg mendidih (100 °C) pada kondisi STP (*Standard Temperature Pressure*) dari suhu awal 30 °C yakni 294 kJ. Pertanyaannya adalah: Apakah bahan bakar atau listrik yang digunakan akan sama dengan total energi yang dibutuhkan tersebut? Jawabannya tidak. Pada aplikasinya, dibutuhkan energi yang lebih besar karena digunakan juga untuk memanaskan wadah, kerugian energi akibat perbedaan suhu ruang dan kerugian dari kompor yang digunakan. Jika data tersebut diurai, maka akan terlihat lebih jelas, yakni:

- Energi yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu air pada kasus di atas adalah 294 kJ
- Kompur (asumsikan kompor listrik) melakukan kerja (*work*) untuk memanaskan air tersebut lebih dari 294 kJ. Katakan total kerugian kompor sebesar 30%, sehingga total kompor melakukan kerja (*work*) adalah $294 \text{ kJ} + (30\% \times 294 \text{ kJ}) = 382.2 \text{ kJ}$
- Kompur melakukan “kerja selesai (*work done*)” sebesar 294 kJ (sesuai dengan energi yang dibutuhkan untuk berhasil menaikkan air pada kondisi di atas)
- Total energi yang masuk ke kompor adalah 382.2 kJ

Studi kasus di atas dapat dikaji kembali untuk lebih memahami perbedaan antara energi, *work* dan *work done*.

2. Pada kasus sistem mekanik (perpindahan) sederhana

“Untuk memindahkan benda persegi dengan massa 10 kg pada percepatan 2 m/s^2 sejauh 1 meter dibutuhkan energi sebesar 20 N.m atau 20 J”

Berdasarkan data di atas, maka dengan mudah kita dapat memperhitungkan berapa energi yang dibutuhkan jika ingin memindahkan benda tersebut sejauh 1 km yakni 20,000 J atau 20kJ. Pertanyaannya: jika benda tersebut didorong oleh manusia, apakah energi yang dikeluarkan oleh manusia tersebut sama dengan 20kJ? Jawabnya tentu tidak.

Adanya koefisien gesek permukaan, atau bahkan gesekan dengan udara, gesekan antara alas kaki dengan permukaan tanah membutuhkan energi. Katakan dibutuhkan energi ekstra untuk melawan kerugian (gesekan-gesekan tersebut) dengan total 20% dari energi yang dibutuhkan untuk benda tersebut. Maka, dapat ditulis dengan lebih jelas sebagai berikut:

- a. Energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan benda tersebut pada kondisi di atas adalah 20 kJ
- b. Manusia yang melakukan kerja (*work*) untuk menggerakkan benda tersebut membutuhkan energi sebesar $20\text{kJ} + (20\% \times 20\text{kJ}) = 24 \text{ kJ}$. Maka, total kerja (*work*) yang dilakukan manusia tersebut adalah 24 kJ
- c. Manusia melakukan “kerja selesai (*work done*)” sebesar 20 kJ (sesuai dengan energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan benda tersebut pada kondisi yang disebutkan)
- d. Total energi yang dikeluarkan manusia adalah sama dengan jumlah kerja (*work*) yakni 24 kJ

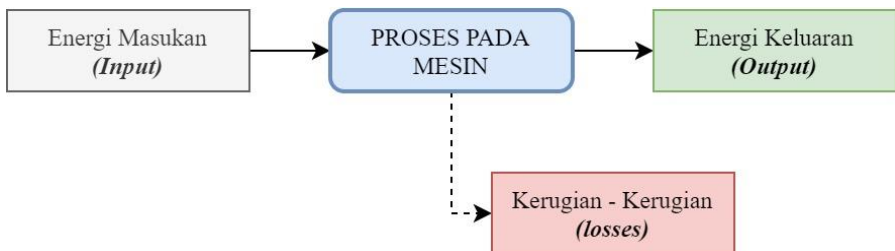
Definisi energi pada hakikatnya jauh lebih luas lagi, namun konsep di atas sudah cukup mencakup aspek penting sebagai pengetahuan utama untuk memahami konsep penyimpanan energi. Pemahaman dari konsep energi pada bagian definisi ini harus dipahami dan diresapi secara kuat karena menjadi modal penting untuk pembahasan berikutnya.

B. PENGGUNAAN ENERGI

Terdapat alasan tersendiri kenapa satuan energi dan satuan kerja (baik *work* maupun *work-done*) adalah sama. Perubahan energi dari satu bentuk ke bentuk lain terjadi karena adanya penggunaan energi melalui suatu sistem atau peralatan yang menggunakan energi. Contoh paling sederhana adalah lampu yang mengkonsumsi energi listrik dan merubahnya menjadi energi panas dan energi cahaya. Ya, terdapat energi panas pada lampu

yang merupakan nilai kerugian energi dari proses perubahan energi pada lampu. Cahaya merupakan energi keluaran yang diharapkan sehingga besarnya energi yang menjadi cahaya dapat dikatakan sebagai *work-done* dari lampu dan besarnya energi panas dan energi cahaya yang dihasilkan lampu adalah *work*.

Energi hanya akan memiliki manfaat jika digunakan. Peralatan untuk merubah energi sangat banyak, termasuk tubuh manusia yang merubah energi kimia pada makanan menjadi energi gerak (untuk otot dan sel) dan panas. Penggunaan energi pada peralatan konversi energi (selanjutnya disebut dengan mesin konversi energi) bertujuan untuk merubah energi masukan (*input*) menjadi energi keluaran (*output*) yang dibutuhkan melalui proses kerja mesin. Sejalan dengan hukum termodinamika pertama yang menyatakan energi hanya bisa diubah, terdapat hukum termodinamika kedua yang secara berkaitan dengan efisiensi. Makna efisiensi disini adalah tidak mungkin suatu mesin mampu merubah 100% energi masukan menjadi kerja efektif (*work-done*) atau menjadi energi yang dibutuhkan. Perhatikan ilustrasi pada Gambar 1.1 terkait skema proses konversi energi.



Gambar 1.1 Skema konversi energi dari satu bentuk ke bentuk lain

Apapun jenis mesin atau model sistem energi, perubahan energi pasti mengacu kepada sketsa di atas. Ilustrasi pada pembahasan sebelumnya telah menunjukkan dengan jelas contoh skema ini. Pemanasan air dan proses menggerakkan benda selalu membutuhkan energi lebih sebagai energi masukan. Sejalan dengan hukum konservasi energi, maka (Pers. 1) [2]:

$$\text{Total energi masukan} = \text{Total energi keluaran} + \text{Kerugian - Kerugian (losses)} \quad (1)$$

Hukum ini menjadi suatu hal yang sangat mutlak dan tidak bisa dilawan, sehingga muncul istilah “*you can’t win!*” terkait dengan hukum di atas. Artinya, sebaik apapun sistem perubahan energi yang dibuat, sistem ini pasti memiliki kerugian-kerugian yang tidak bisa dihindari. Inovasi dan penelitian berkelanjutan hanya bertujuan untuk meminimalisir kerugian-kerugian. Sebagai contoh, Tabel 1.1 menunjukkan data teknis dari evolusi lampu penerangan.

Tabel 1.1 Inovasi lampu penerangan [3]

Tipe	Lampu Pijar		CFL	LED
	Standar	Halogen		
Konsumsi energi (W)	60	43	13	9
Biaya energi (\$/tahun)	7.23	5.18	1.57	1.08
Usia pakai (tahun)	1	1 – 3	6 – 10	15 – 20

Kuantitas energi cahaya dari lampu di atas adalah sama, namun jumlah konsumsi energinya berbeda. Lampu yang digunakan saat sekarang memiliki konsumsi energi (daya) yang rendah dengan usia pakai yang jauh lebih lama.

Inovasi pada lampu di atas difokuskan untuk meminimalisir kerugian saat proses konversi energi. Listrik masuk ke lampu dan diubah menjadi energi cahaya dan panas. Energi panas merupakan kerugian karena ini tidak dikehendaki atau dibutuhkan. Tabel 1.2. menyajikan beberapa mesin konversi energi sederhana dengan energi masukan, kerugian dan energi keluaran.

Tabel 1.2 *Input–Proses–Output* pada sistem konversi energi

Sistem Konversi Energi	Energi		
	Input	Proses	Output
Lampu	Listrik	Panas	Cahaya
Kipas angin	Listrik	- Panas - Rugi pada dinamo	Gerak
Mesin <i>Otto</i>	Kimia (pada bahan bakar)	- Panas - Mekanik (pompa, gesekan, dll)	Gerak
Pemanas air	Listrik	- Panas pada komponen - Panas ke lingkungan	Panas
<i>Transformer</i> (Trafo)	Listrik	- Panas pada komponen - Rugi listrik pada lilitan	Listrik

Meskipun energi masukan dan keluaran sama, tetap ada kerugian akibat proses konversi energi. Fokus inovasi selalu bertujuan untuk memaksimalkan keluaran dan meminimalisir kerugian, bukan menghilangkan kerugian. Pada pemodelan angka yang mengacu kepada Persamaan 1, maka ilustrasi ini cukup memberikan gambaran jelas:

1. Jika energi listrik yang masuk sebesar 100 J pada lampu, maka mustahil cahaya yang dihasilkan akan menghasilkan energi yang setara 100 J;
2. Jika energi listrik yang masuk pada trafo adalah 200 J, maka mustahil trafo tersebut bisa menghasilkan energi keluaran yang sama yakni 200 J, meskipun terjadi perubahan besaran tegangan dan arus listrik.

Artinya cukup jelas: bahwa energi masukan akan selalu lebih besar dari energi keluaran yang berarti tidak ada sistem yang dapat memproduksi energi keluaran lebih besar dari energi masukan (misalnya energi masukan 100 J lalu energi keluaran 200 J).

C. PENYIMPANAN ENERGI

Jika energi digunakan secara terus menerus, maka dibutuhkan suatu mekanisme penyimpanan energi. Makhluk hidup menyimpan energi untuk keberlangsungan hidupnya seperti tumbuhan yang menyimpan energi pada buah atau mekanisme lainnya; manusia dan binatang menyimpan energi dalam bentuk lemak. Penyimpanan ini bertujuan untuk menjamin keberlangsungan dari kerja (atau kehidupan pada kasus makhluk hidup) dari sistem yang membutuhkan energi. Pada aplikasi sehari-hari, kita banyak melihat contoh penyimpanan energi, mulai dari penyimpanan sederhana sampai kompleks. Beberapa contoh penyimpanan energi pada aplikasi sehari-hari antara lain:

1. Tangki bahan bakar pada kendaraan
2. Baterai untuk gawai dan aplikasi elektronik lainnya
3. Air yang ditampung pada bendungan, dll.

Sistem konversi energi mutlak membutuhkan penyimpanan energi untuk menjamin keberlangsungan fungsinya. Karena sifat dan bentuk dari energi yang beragam, maka bentuk penyimpanan, cara menyimpan dan

cara mengambilnya kembali juga berbeda-beda. Sebagai contoh, dibutuhkan pompa bahan bakar untuk mendorong bahan bakar dari tangki ke mesin; dibutuhkan material kimia tertentu untuk menyimpan listrik pada baterai; dibutuhkan bentuk bendungan tertentu untuk menampung air. Dari sini dapat terlihat, pertimbangan terkait bentuk dan metode penyimpanan, yakni:

1. Sifat aplikasi, apakah bergerak (*mobile*) atau diam (*stationary*)
2. Sifat energi yang disimpan (penyimpanan energi panas, mekanik dan kimia misalnya);
3. Sifat dari media penyimpanan energi (contoh: penyimpanan air tidak membutuhkan tekanan namun penyimpanan gas atau udara membutuhkan tekanan).

BAB
2

TERMODINAMIKA PADA PENYIMPANAN ENERGI

A. HUKUM TERMODINAMIKA

Hukum termodinamika menjadi landasan dasar dalam pembahasan energi. Semua kaidah umum dan aspek-aspek yang berkaitan dengan energi mengikat pada hukum baku dari termodinamika. Pembahasan termodinamika sendiri sangat detail. Pada bagian ini, hukum termodinamika dibahas secara ringkas dan komprehensif sesuai hubungannya dengan sistem penyimpanan energi.

Termodinamika merupakan dasar dari sistem energi dan dapat diartikan sebagai sains dari energi. Termodinamika diambil dari kata *therme* (kalor) dan *dynamis* (bergerak) yang secara bahasa diartikan kalor yang bergerak. Dari sekian banyak energi, kata kalor menjadi pilihan karena ini merupakan bentuk dasar dari energi yang paling sering digunakan. Dinamis (bergerak) digunakan untuk menunjukkan adanya interaksi atau pergerakan dari energi. Fenomena sehari-hari menunjukkan fenomena termodinamika seperti:

- a. Secangkir kopi panas yang diletakkan pada suhu ruang lambat laun menjadi dingin
- b. Proses karatnya paku yang diletakkan pada udara bebas setelah sekian waktu tertentu

- c. Berubahnya es menjadi air lalu menjadi gas pada proses pemanasan dan sebaliknya

Aplikasi yang lebih nyata melibatkan kehidupan sehari-hari manusia. Bidang teknik dan kehidupan manusia sangat erat dengan termodinamika. Sistem penyejuk udara (*air conditioner*), pemanas air, pembangkit listrik, listrik yang digunakan bahkan proses memasak merupakan proses termodinamik. Pemahaman yang kuat terkait dengan termodinamika sangat dibutuhkan secara khusus untuk aspek yang berkaitan erat dengan energi, khususnya pada bidang teknik dan rekayasa energi. Terdapat empat hukum termodinamika, namun yang akan dibahas secara spesifik pada sub bab 2.1.1 – 2.1.3 adalah hukum ke nol, pertama dan kedua.

1. Hukum Termodinamika ke Nol (*Zeroth Law*)

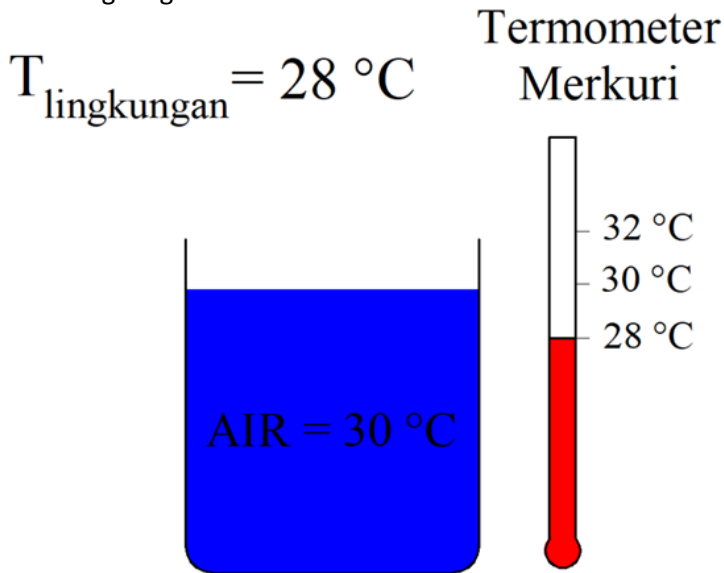
Hukum ke nol termodinamika berkaitan erat dengan temperatur [4]. Alasan disebut dengan hukum ke nol karena hukum ini membahas sesuatu yang mungkin sudah dipahami secara umum yakni temperatur. Temperatur sendiri memiliki pemahaman yang lebih spesifik pada termodinamika. Temperatur kadang disalahartikan sebagai suatu kondisi misalnya: panas, dingin, beku, menguap, dan sejenisnya. Kondisi tersebut sifatnya sangat relatif dan diperlukan suatu nilai khusus untuk menyatakan kondisi di atas.

Perbedaan perspektif ini dibuat menjadi lebih jelas pada hukum termodinamika ke nol. Sebagai contoh, panas kadang dideskripsikan pada kondisi suhu yang naik mendekati nilai 100°C , dan atau kondisi dingin pada kondisi suhu mendekati nilai 0°C . Tentunya kondisi tersebut tidak bisa digunakan pada sains dan bidang teknik. Contoh yang paling gampang adalah lantai keramik terasa lebih dingin dan lantai kayu terasa lebih hangat meskipun keduanya pada temperatur yang sama.

Pengukuran temperatur menggunakan material yang bergantung terhadap temperatur misalnya merkuri dan *thermocouple* memanfaatkan fenomena hukum ke nol termodinamika. Kenaikan atau penurunan temperatur yang dialami oleh merkuri dan *thermocouple* menyebabkan terjadinya perubahan kondisi pada keduanya. Kenaikan temperatur pada merkuri menyebabkan ekspansi volume dan penurunan temperatur menyebabkan penyusutan pada nilai yang tetap. Kenaikan dan penurunan

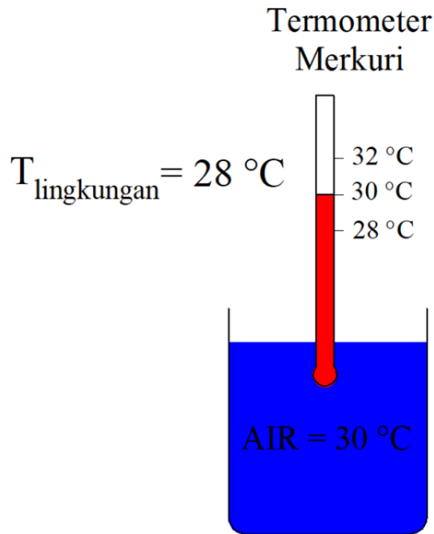
temperatur yang dirasakan oleh *thermocouple* menyebabkan perubahan nilai tahanan internal dari *thermocouple*. Perubahan-perubahan tersebut memiliki suatu nilai konstan yang dari nilai ini digunakan untuk menentukan nilai kenaikan atau penurunan temperatur.

Merkuri dan *thermocouple* merasakan temperatur dari benda atau kondisi yang diukur. Keduanya dapat merasakan temperatur karena adanya fenomena perpindahan kalor antara benda ukur dengan media ukur (merkuri dan *thermocouple*). Jika merkuri dan *thermocouple* merasakan temperatur yang sama dengan benda ukur, maka nilai awal yang ditampilkan tidak akan berubah. Perhatikan ilustrasi pada Gambar 2.1. terkait benda ukur (air pada suatu wadah isolasi), termometer merkuri dan lingkungan.



Gambar 2.1 Ilustrasi interaksi termometer dengan lingkungan

Nilai pada termometer merkuri menunjukkan 28°C karena suhu lingkungan berada pada suhu 28°C . Pada kondisi ini, terjadi *thermal equilibrium* (kesetimbangan termal) antara termometer merkuri dengan udara sekitar. Hal ini juga berlaku ketika termometer dicelupkan ke air sebagaimana terlihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Hubungan benda ukur dan alat ukur pada temperatur berbeda

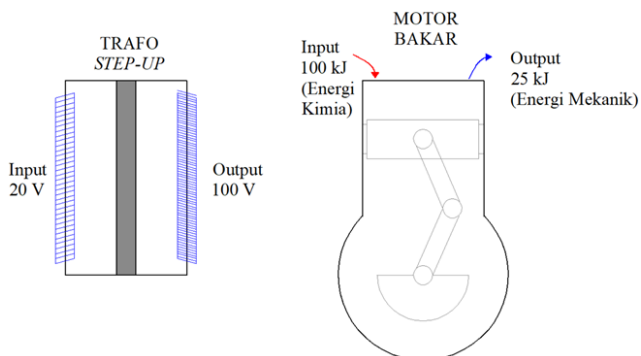
Merkuri pada tabung termometer menunjukkan $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ karena menyerap kalor dari air yang memiliki suhu $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Serupa dengan kondisi sebelumnya, terjadi *thermal equilibrium* (kesetimbangan termal) antara termometer merkuri dengan air yang diukur. Inti dari hukum ke nol termodinamika adalah kesetimbangan termal dimana dua atau lebih sistem termodinamika yang berbeda temperaturnya akan mencapai titik kesetimbangan. Hal ini dapat diamati pada aplikasi sehari-hari seperti mencairnya es pada suhu lingkungan yang lebih tinggi dan membekunya air pada aplikasi pendinginan. Perlu diketahui, temperatur hanya menjadi indikator untuk terjadinya perpindahan kalor dari satu sistem ke sistem lainnya.

2. Hukum Termodinamika Pertama (*First Law*)

Jika hukum ke nol termodinamika membahas kesetimbangan termal, maka hukum pertama termodinamika fokus terhadap energi. Pernyataan sederhana dari hukum pertama adalah “energi tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, energi hanya dapat berubah bentuk” [4]. Hukum pertama juga dikenal dengan istilah konservasi energi. Hukum ini memberikan dua informasi penting bahwa:

- 1) Energi masukan pada sistem termodinamika dibutuhkan, bukan dihasilkan ataupun diproduksi secara mandiri. Contoh konsep:
 - a. Mesin pembakaran membutuhkan bahan bakar untuk bekerja. Bahan bakar ini tidak diproduksi sendiri oleh mesin pembakaran.
 - b. Mesin listrik membutuhkan energi listrik untuk bekerja. Energi listrik yang masuk ke mesin listrik diperoleh dari sumber luar dan tidak diproduksi secara mandiri oleh mesin listrik.
- 2) Perubahan energi masukan melalui proses pada mesin konversi energi menghasilkan bentuk energi lain dengan jumlah energi total keluaran maksimal sama dengan energi *input* maksimal. Contoh konsep:
 - a. Misalnya total energi dari bahan bakar yang diproses oleh mesin pembakaran sebesar 100 kJ, maka total energi yang keluar dari proses pembakaran adalah 100 kJ dan mustahil bisa melebihi nilai ini;
 - b. Misalnya energi listrik yang dijadikan masukan oleh suatu mesin listrik adalah 1,000 kJ, maka total energi yang keluar dari proses pada mesin listrik adalah 1,000 kJ juga dan tidak akan pernah kurang atau lebih dari nilai ini.

Kesalahan penafsiran yang sering terjadi adalah energi keluaran dari sistem termodinamika dapat lebih tinggi dari energi masukan (surplus) atau kurang dari energi masukan (defisit) (Gambar 2.3.). Sebagai catatan, jika kasus yang disalah tafsirkan adalah kelebihan energi, maka hal ini umumnya terjadi karena kesalahan dalam menafsirkan satuan yang digunakan.



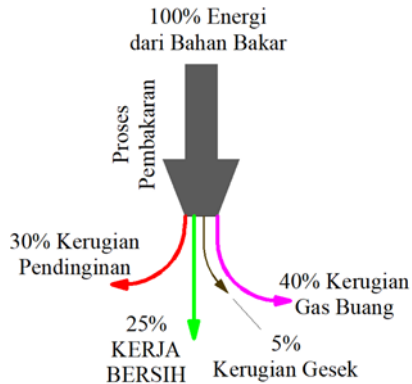
Gambar 2.3 Perubahan energi masukan dan keluaran pada trafo dan motor bakar

Contoh: *transformer* (trafo) merubah tegangan atau arus listrik yang masuk melalui rekayasa jumlah lilitan sehingga nilai tegangan atau arus bisa saja lebih tinggi dari nilai masukannya (tergantung jenis trafo, *step-up* atau *step-down*) namun trafo tidak merubah total energi keluaran, karena nilai energi listrik tetap dihitung berdasarkan satuan Joule bukan Volt atau *Ampere*. Pada kasus ketika energi keluaran lebih kecil dibandingkan masukan, misalnya pada motor bakar, hal ini terjadi karena kesalahan tafsir terhadap nilai energi yang dihasilkan, misalnya masukan energi bahan bakar 100 kJ kemudian dikonversi menjadi energi mekanik sebesar 25 kJ, nilai energi mekanik merupakan nilai yang diharapkan dari proses konversi bahan bakar dan nilai energi yang tidak dikehendaki misalnya kerugian energi panas tidak diperhitungkan. Hal ini berkaitan dengan hukum kedua termodinamika yang berkaitan dengan efisiensi.

3. Hukum Termodinamika Kedua (*Second Law*)

Hukum kedua dijadikan pelengkap untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan yang tidak bisa diselesaikan oleh hukum ke nol dan pertama. Hukum pertama fokus terhadap kuantitas dan perubahan bentuk energi, sedangkan hukum kedua secara ringkas membahas tentang arah perubahan energi dan efisiensi. Terdapat dua pernyataan yang digunakan untuk merumuskan hukum kedua termodinamika yakni pernyataan Kelvin–Plan dan Clausius [4]. Bunyi hukum kedua secara sederhana menyatakan bahwa tidak mungkin ada suatu mesin/alat yang dapat merubah seluruh energi masukan menjadi kerja. Artinya, tidak ada efisiensi 100%.

Hukum kedua memberikan penjelasan lebih detail dari Tabel 1.2. dimana pada sistem *input–proses–output* suatu mesin energi, terdapat kerugian-kerugian yang tidak dikehendaki. Hal ini digunakan juga untuk menjawab mispersepsi sebagaimana yang dicontohkan pada kasus hukum pertama termodinamika terkait dengan proses konversi energi. Trafo memiliki kerugian yakni panas pada komponen dan rugi aliran akibat adanya tahanan internal pada kabel atau lilitan, sehingga tidak mungkin diperoleh energi keluaran yang berguna (atau kerja dalam bahasa sederhana) yang nilainya sama dengan energi masukan.



Gambar 2.4 Persentase perubahan energi pada mesin pembakaran dalam [5]

Contoh yang sangat jelas untuk hukum kedua berkaitan dengan efisiensi adalah perubahan energi kimia pada bahan bakar melalui proses pembakaran (Gambar 2.4.). Energi kimia yang diproses tidak sepenuhnya bisa dimanfaatkan menjadi energi gerak, karena adanya rugi gesekan antara piston dan silinder, rugi pendinginan, rugi mekanis untuk pompa-pompa dan juga kerugian akibat pembakaran yang tidak sempurna sehingga jelas tidak 100% energi masukan berhasil digunakan untuk kerja bersih (dalam hal ini gerak mesin). Pada kajian termodinamika terapan, hukum termodinamika kedua berkaitan erat dengan entropi dan arah suatu proses termodinamika.

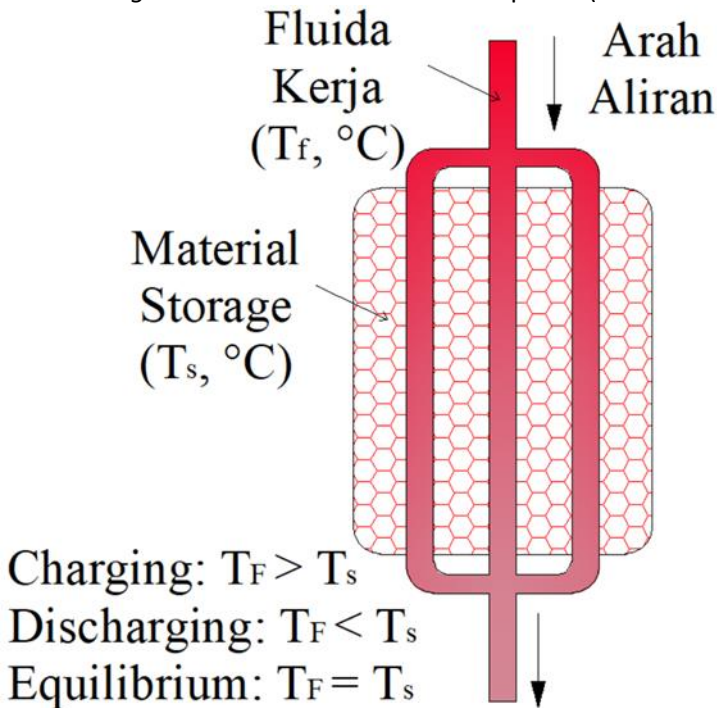
B. TERMODINAMIKA DAN *ENERGY STORAGE* (ES)

Bahasan mengenai hukum termodinamika merupakan dasar yang sangat penting bagi sistem *energy storage*. Pada perspektif energi, seluruh aktivitas *energy storage* berkaitan dengan hukum-hukum baku termodinamika dan hal ini menjadi fundamental terpenting bagi sistem *energy storage*. Hubungan ini digambarkan pada sub bab 2.2.1 – 2.2.3.

1. *Energy Storage* dan Hukum Ke Nol Termodinamika

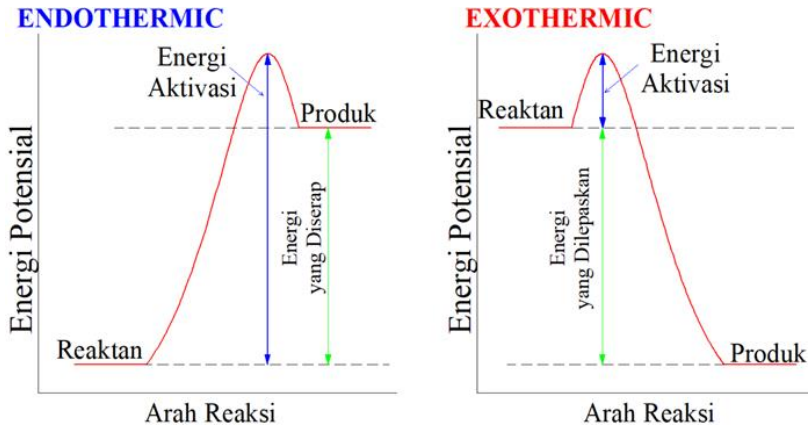
Pola hubungan yang digambarkan antara *energy storage* dan hukum ke nol berkaitan dengan sistem *energy storage* yang melibatkan suhu sebagai indikator nilai energinya. Aplikasi hubungan ini sangat jelas diperlihatkan pada *thermal energy storage* dan *chemical energy storage*. Hubungan lebih detailnya adalah:

- a. Pada sistem *thermal energy storage*, perpindahan energi terjadi hanya jika adanya perbedaan suhu. Artinya, untuk proses *charging* (pengisian energi ke material *energy storage*), *storing* (penyimpanan energi pada material *energy storage*), dan *discharging* (pengisian energi dari material *energy storage*) harus melibatkan perbedaan suhu antara material *storage* dan unit sumber atau beban panas (Gambar 2.5.).



Gambar 2.5 Skema perpindahan panas pada *thermal energy storage* [6]

- b. Pada sistem *chemical energy storage*, untuk reaksi yang bersifat *endothermic* maupun *exothermic* pasti berkaitan dengan suhu atau temperatur. *Endothermic* merupakan reaksi yang bersifat menyerap kalor dari lingkungan sehingga nilai energi produk lebih tinggi dibandingkan dengan nilai reaktan. *Exothermic* merupakan reaksi sebaliknya yakni melepas kalor ke lingkungan sehingga nilai energi produk lebih rendah dibandingkan dengan energi pada reaktan (Gambar 2.6.).



Gambar 2.6 Model reaksi *endothermic* dan *exothermic* [7]

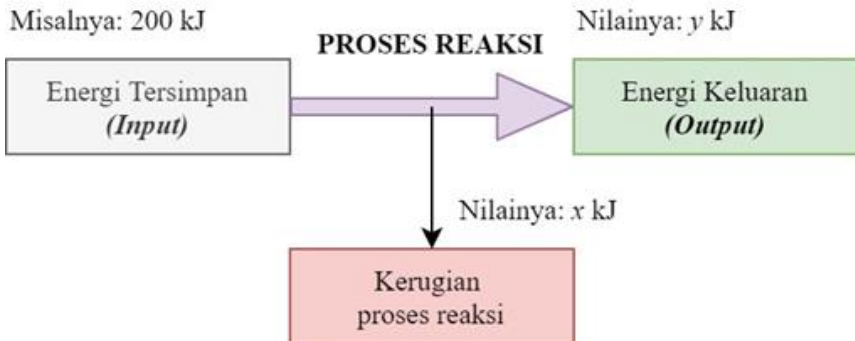
Pada prinsipnya, hubungan antara hukum ke nol termodinamika dan *energy storage* tidak terbatas hanya untuk *thermal* dan *chemical energy storage*, model penyimpanan energi lain seperti penyimpanan listrik pada baterai, penyimpanan energi mekanik pada *flywheel* atau *pumped storage* dan juga penyimpanan energi kimia pada bahan bakar tetap berhubungan dengan hukum ke nol termodinamika. Namun, keseluruhan sistem penyimpanan tersebut tidak bergantung secara signifikan pada hukum ke nol termodinamika. Kesimpulannya, hubungan antara hukum ke nol termodinamika dengan *energy storage* berkaitan erat dengan gradiensi atau perbedaan temperatur.

2. *Energy Storage* dan Hukum Pertama Termodinamika

Hukum termodinamika pertama mengatur tentang kuantitas dan perubahan energi dari satu bentuk ke bentuk lain, sehingga hukum ini juga berlaku untuk sistem *energy storage*. Hubungan antara hukum pertama termodinamika dengan *energy storage* berkaitan erat dengan sistem *energy storage* yang bekerja berdasarkan prinsip perubahan bentuk energi, seperti:

- a. Energi kimia menjadi listrik pada baterai

Energi kimia yang terkandung pada material *storage* bereaksi dengan sistem sehingga menghasilkan perbedaan potensial dan menjadi energi listrik. Proses yang berlangsung ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Proses perubahan energi kimia (*input*) menjadi energi keluaran (*listrik*)

Nilai total energi keluaran (y) ditambah dengan nilai total kerugian proses reaksi (x) akan sama dengan nilai energi tersimpan yang menjadi masukan (dalam skenario ini 200 kJ). Artinya, meskipun energi berubah dari energi kimia menjadi energi listrik dan energi lain yang termasuk kategori kerugian energi (biasanya energi panas reaksi), nilai total energi akan tetap sama.

- b. Energi kimia menjadi energi panas melalui proses pembakaran pada bahan bakar

Pola ini sangat sama dengan proses perubahan energi kimia menjadi energi panas dan gerak pada proses pembakaran di mesin pembakaran dalam.

- c. Energi mekanik menjadi energi listrik pada *hydropower*

Sistem *hydropower* secara prinsip memanfaatkan energi potensial pada air ditampung atau disimpan di tempat yang lebih tinggi (misalnya bendungan). Energi potensial air diubah menjadi energi gerak dengan adanya turbin, selanjutnya energi gerak turbin diubah menjadi listrik sebagai energi keluaran yang diinginkan. Proses berubahnya energi potensial menjadi energi gerak pada turbin kemudian menjadi energi listrik menunjukkan adanya perubahan bentuk energi dari bentuk energi awal yang disimpan. Besarnya energi yang dikeluarkan di awal akan sama

dengan total seluruh energi yang dihasilkan dari proses perubahan tersebut.

d. Energi mekanik menjadi energi listrik pada turbin angin

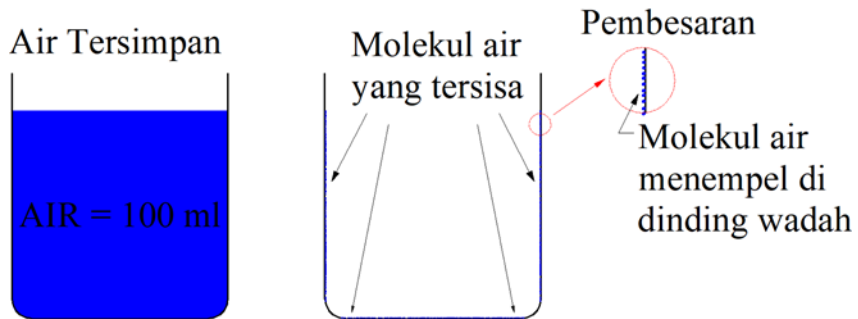
Prinsip perubahan energi ini juga sama dengan pola pada *hydropower*, dimana energi gerak angin diubah menjadi gerak pada bilah turbin, yang kemudian dihubungkan dengan generator untuk menghasilkan listrik.

3. *Energy Storage* dan Hukum Kedua Termodinamika

Hubungan antara hukum kedua termodinamika dengan *energy storage* sangat penting. Hukum termodinamika kedua yang bicara tentang kualitas energi dan efisiensi menjadi penting dalam sistem *energy storage* karena berhubungan erat dengan efisiensi *storage*. Sistem *energy storage* merupakan sistem penyimpanan energi, yang berarti ada proses pemasukan energi, proses penyimpanan energi dan proses pengeluaran energi. Keseluruhan proses memiliki nilai efisiensi sendiri. Khusus untuk proses pemasukan dan pengeluaran energi dari material *storage*, hal ini didominasi oleh faktor desain yang dibuat, sehingga hanya fungsi proses penyimpanan energi yang dikaji lebih dalam terkait hubungannya dengan hukum kedua termodinamika.

Hubungan hukum kedua termodinamika dengan *energy storage* secara khusus berkaitan dengan efisiensi penyimpanan. Hubungan tersebut dapat dianalogikan berdasarkan dua skenario di bawah ini.

Penyimpanan Air pada Suatu Wadah, Suatu wadah digunakan untuk menyimpan air. Air yang disimpan pada wadah adalah 100 ml. Apakah air yang dikeluarkan dari wadah nantinya akan 100 ml? Untuk skenario sederhana mungkin dapat dikatakan iya, bahwa air yang dikeluarkan dari wadah adalah sama yakni 100 ml. Namun, pada bidang teknik dan rekayasa yang membutuhkan perhitungan detail karena terkait dengan banyak hal, khususnya biaya dan kemampuan sistem teknik, maka total air yang dikeluarkan adalah lebih rendah dari total air yang disimpan. Hal ini terjadi karena sebagian kecil molekul air masih menempel dipermukaan wadah yang digunakan (akibat dari fenomena *hydrophile*), sehingga jika dilakukan pengukuran yang teliti, maka akan diperoleh bahwa air yang dikeluarkan adalah kurang dari 100 ml.



Gambar 2.8 Kerugian penyimpanan akibat desain wadah (*bed storage*)

Nilai kehilangan akibat molekul yang menempel atau tersisa di wadah mungkin sangat sedikit (1 – 2% total massa atau volume yang tersimpan), meskipun demikian, hal ini tidak boleh diabaikan. Bayangkan jika suatu *bed storage* menyimpan material *energy storage*, misalnya *molten salt*, sebanyak 500 ton, maka nilai kerugian akibat wadah penyimpanan berkisar antara 1 – 2 ton, tentu ini adalah nilai yang fantastis. Terlebih jika dikaitkan dengan efisiensi menyeluruh dari sistem dan biaya, nilai ini bisa lebih fantastis. Sebagai gambaran, harga *molten salt* umumnya pada rentang 100 USD/kg, maka total kerugian akibat wadah sendiri sudah mencapai 100,000 – 200,000 USD (*equivalen* Rp. 1.5 – 3.0 milyar dengan estimasi 1 USD = Rp. 15,000).

Penyimpanan Air Hangat pada Termos, Suatu wadah (termos) digunakan untuk menyimpan air hangat pada volume 300 ml dengan suhu awal sebesar 95 °C dimana suhu di sekitar termos adalah 30 °C. Tentu kita semua mengetahui, cepat atau lambat air di dalam termos akan sama dengan suhu lingkungan. Cepat atau lambatnya penurunan suhu air yang tersimpan bergantung pada isolator yang digunakan oleh termos. Semakin baik sifat isolator yang digunakan, semakin lambat penurunan suhu air yang tersimpan. Meskipun demikian, sehebat apapun isolator yang digunakan, suhu air akan selalu mendekati ke suhu lingkungan karena adanya pengaruh perpindahan panas untuk mencapai *thermal equilibrium* dan sifat *spontaneous* proses sejalan dengan hukum kedua termodinamika. Pada kasus ini, efisiensi penyimpanan dilihat pada aspek *storing efficiency* berdasarkan waktu penyimpanan. Jika pada kasus wadah nilai *efficiency* dinilai berdasarkan banyak atau sedikitnya material tersimpan yang

mampu dikeluarkan oleh *bed storage*, maka pada kasus termos nilai *efficiency* yang dilihat adalah durasi penyimpanan berdasarkan waktu. Nilai *efficiency* berdasarkan waktu banyak melibatkan faktor tambahan, seperti jenis isolator yang digunakan, berapa besar gradiensi suhu penyimpanan dan suhu sekitar. Pembahasan lebih detail terkait dengan efisiensi penyimpanan ada pada BAB IV yang fokus membahas parameter yang ada pada sistem penyimpanan energi.



SISTEM PENYIMPANAN ENERGI

A. PENGANTAR PENYIMPANAN ENERGI

Penyimpanan energi pada masa sekarang telah dikembangkan dengan sangat pesat sehingga dapat memberikan kontribusi penting dalam teknologi energi modern. Terlebih dengan semakin meningkatnya isu tentang pemanfaatan energi terbarukan yang ramah lingkungan, seperti matahari dan angin, membuat pengembangan dari penyimpanan energi semakin maju. Penyimpanan energi memainkan peranan penting pada sistem energi terbarukan untuk menjaga suplai energi yang diproduksi tetap stabil meskipun sumber energinya bersifat *intermittent* (contoh angin yang tidak selalu berhembus dan matahari yang tidak selalu bersinar).

Penyimpanan energi berkontribusi penting untuk memenuhi kebutuhan energi yang lebih luas, seperti aplikasi pemanasan dan pendinginan bangunan (khususnya untuk negara sub-tropis), pembangkitan energi di luar angkasa, dan juga perlengkapan lainnya seperti desalinasi air laut dan pengeringan makanan. Penyimpanan energi memberikan keuntungan yang signifikan, yakni:

1. Mengurangi biaya energi
2. Mengurangi konsumsi energi (peningkatan efisiensi sistem)
3. Memungkinkan untuk membuat ukuran perlengkapan yang lebih kompak

4. Pengurangan emisi gas rumah kaca.

B. PENYIMPANAN ENERGI SEBAGAI SISTEM

Meskipun memiliki banyak keuntungan dan potensi untuk digunakan pada skala besar, penyimpanan energi sebagai sebuah sistem sangat kompleks dan tidak bisa hanya dilihat sebagai suatu sistem energi sederhana. Untuk membuat sistem penyimpanan energi, dibutuhkan pemahaman yang kuat terkait dengan suplai energi dan aplikasinya pada pengguna akhir [8]. Penyimpanan energi sebagai sebuah sistem memerlukan perlengkapan tambahan dan perhitungan mendetail untuk memaksimalkan pemanfaatan dari energi yang tersimpan. Berikut contoh 2 kasus sederhana yang dapat dipertimbangkan sebagai contoh dari sistem penyimpanan energi.

1. Sistem Penyimpanan Bahan Bakar Kendaraan

Bahan bakar (misalnya bensin) yang ada di tangki harus dipompa ke mesin untuk dapat digunakan pada proses pembakaran. Dalam proses pemompaan, tekanan dari bahan bakar yang dipompakan, kapasitas dan durasi penginjeksian bahan bakar harus diatur secara seksama. Guna mencapai target tersebut, maka digunakan beberapa perlengkapan yakni pompa bahan bakar, *injector*, ECU (*Electronic Control Unit*) dan *fuel pulsation damper* untuk menstabilkan tekanan kerja di sistem. Lebih lanjut, bahan bakar yang tidak diinjeksikan harus bisa kembali lagi ke tanki, oleh karenanya dipasang pula *fuel return line*. Banyak sedikitnya bahan bakar yang tersisa harus dapat diketahui oleh pengguna, maka harus dilengkapi dengan *fuel gauge indicator*. Ketika bahan bakar habis, maka harus dibuat saluran khusus untuk mengisi kembali bahan bakar yang habis. Meskipun terlihat sederhana dan sering digunakan, sistem penyimpanan energi bahan bakar kendaraan cukup kompleks dan seluruhnya harus diperhitungkan secara seksama untuk menghindari kerugian penggunaan. Bayangkan, jika tidak menggunakan *fuel return line*, maka bahan bakar yang tidak diinjeksikan otomatis akan terbuang percuma. Sistem ini bisa terlihat sederhana karena sudah mencapai taraf produksi massal dengan teknologi tinggi, hal yang sama juga dapat berlaku untuk sistem penyimpanan energi lainnya.

2. Sistem Penyimpanan Listrik pada Baterai Kendaraan

Baterai (dalam hal ini baterai 12 VDC sebagai sumber listrik utama untuk kelengkapan sistem kendaraan, pengapian, penerangan, penggerak mula, dan sejenisnya) berfungsi untuk mengalirkan listrik ke sistem kelistrikan kendaraan. Proses mengalirnya listrik ini membutuhkan beberapa unit kelengkapan tambahan yakni pengaman kelistrikan dan beberapa komponen terkait. Baterai harus diisi ulang (*charging*) agar muatan listriknya tidak habis, untuk mencapai hal tersebut maka pada kendaraan dilengkapi sistem pengisian. Baterai memiliki tegangan pengisian tertentu yang tidak boleh dilewati (sekitar 15.2 VDC), oleh karenanya pada sistem pengisian dilengkapi dengan *charging* regulator untuk mengatur hal ini. Pengemudi harus mengetahui apakah baterai yang digunakan saat mesin bekerja sedang dalam pengisian atau tidak guna menghindari kejadian yang tidak diinginkan, maka sistem ini dilengkapi juga dengan baterai indikator yang dipasang di *instrument cluster*. Terlihat jelas bahwa baterai yang digunakan memerlukan beberapa piranti tambahan untuk memaksimalkan penggunaan, menjamin ketersediaan dan kemudahan dalam proses pemantauan kerja baterai. Artinya, baterai merupakan bagian dari sistem penyimpanan energi. Baterai sendiri hanya dapat ditafsirkan sebagai media untuk penyimpanan energi.

Dua contoh kasus di atas memberikan gambaran bahwa untuk bisa memaksimalkan penggunaan energi pada media penyimpanan energi, dibutuhkan beberapa perlengkapan tambahan. Perlengkapan tambahan yang digunakan harus diperhitungkan secara seksama, khususnya terkait dengan kebutuhan energi dari sisi pengguna dan cara mengisi kembali energi tersebut. Memandang hal tersebut, pada prinsipnya, penggunaan penyimpanan energi memberikan peluang yang lebih besar untuk digunakan pada sistem yang kompleks dan mampu memaksimalkan penggunaan energi (dalam ranah efisiensi, baik segi teknis maupun ekonomis) dan menurunkan konsumsi energi dari sumber tidak terbarukan [9]. Beberapa penelitian dan pengembangan terkini pada bidang penyimpanan energi antara lain:

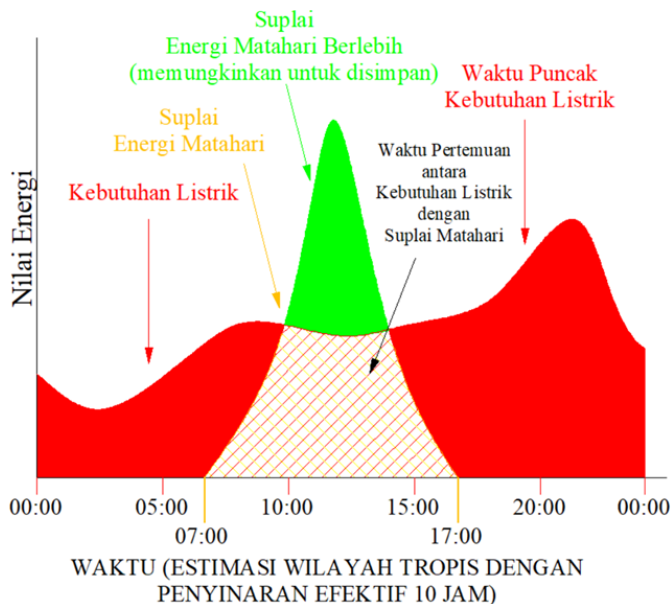
- a. Penyimpanan energi mutakhir dan sistem konversi yang melibatkan perubahan fase, reaksi kimia dan elektrokimia

- b. Fenomena mendasar pada sel baterai tunggal (sel aki untuk contoh sederhana) termasuk rekayasa integrasi dari keseluruhan baterai (beberapa sel yang diintegrasikan pada satu baterai, maupun integrasi beberapa baterai) pada kendaraan listrik
- c. Polimer dengan konstanta dielektrik yang tinggi
- d. Kapasitor berbasis polimer yang terintegrasi (ini yang dikenal dengan penyimpanan super kapasitor atau super *capacitor*).

Pertimbangan yang paling utama dalam sistem penyimpanan energi adalah kebutuhan energi spesifik pada suatu beban energi. Seperti yang sudah disinggung pada contoh di atas, tangki bahan bakar untuk mobil kecil, sepeda motor, bus dan pesawat berbeda-beda, meskipun secara prinsip sama yakni menyimpan bahan bakar. Contoh lain adalah baterai, baterai sebagai sumber penggerak untuk kendaraan listrik dan baterai sebagai sumber listrik untuk sistem kelistrikan kendaraan akan berbeda, baik dalam hal kapasitas maupun kelengkapannya. Hal ini berlaku juga pada sistem energi yang lebih luas dan kompleks seperti pembangkit listrik tenaga uap dan pembangkit listrik tenaga matahari melalui panel surya. Penyimpanan energi dapat digunakan untuk memberikan suplai energi pada saat puncak beban (*peak demand*). Metode ini dapat memberikan manfaat dalam penghematan energi pembangkitan dan juga alternatif pembangkitan [10]. Contoh aplikasi dari penyimpanan energi untuk pemenuhan fungsi tersebut adalah:

- a. Utilitas: produksi energi listrik berdasarkan beban pokok (*base-load*) secara umum tidak mahal dan kelebihan energi yang diproduksi pada larut malam, atau saat kebutuhan mingguan yang rendah, dapat digunakan untuk *charging* media penyimpanan energi. Energi yang disimpan dapat digunakan kembali untuk memenuhi kebutuhan puncak sehingga beban pembangkitan dari turbin gas maupun bahan bakar diesel dapat dikurangi secara signifikan.
- b. Industri: Limbah kalor dari proses industri (*exhaust*, *chimney*, dan *boiler*) dapat disimpan melalui media penyimpanan untuk kemudian digunakan sebagai sistem *preheater* maupun kebutuhan pemanasan lainnya.

- c. *Cogeneration*: merupakan prinsip penggabungan (bukan *hibrid*) dari suatu pembangkit listrik dengan tujuan peningkatan efisiensi dengan cara menggabungkan produksi panas dan listrik yang sesuai dengan kebutuhan, kelebihan listrik yang dihasilkan akan digunakan kembali nanti.
- d. Energi angin dan aliran sungai: suplai energi dari dua sumber alam tersebut secara logis dapat disimpan pada media penyimpanan pada jam-jam beban listrik rendah, kemudian digunakan kembali untuk menyuplai listrik pada jam puncak (*peak*), penerapan metode ini mampu meningkatkan kapasitas faktor dari perlengkapan tersebut yang secara langsung mampu menaikkan nilai ekonomisnya.
- e. Sistem energi surya: pemanfaatan energi surya merupakan contoh paling mudah untuk mengetahui perbedaan antara suplai energi matahari dan kebutuhan listrik. Perhatikan ilustrasi pada Gambar 3.1. terkait dengan suplai dan kebutuhan energi.



Gambar 3.1 Sketsa pemakaian energi listrik dan suplai energi matahari berdasarkan waktu [11]

Terlihat jelas pada Gambar 3.1. bahwa terjadi ketimpangan antara suplai energi matahari dan kebutuhan energi listrik. Pada jam malam, terjadi kenaikan signifikan terkait kebutuhan listrik dan pada jam siang terjadi kenaikan puncak suplai energi matahari berlebih yang tidak digunakan untuk pembangkitan. Suplai energi matahari yang berlebih ini dapat disimpan untuk kemudian digunakan pada jam puncak pemakaian listrik.

C. METODE PENYIMPANAN ENERGI

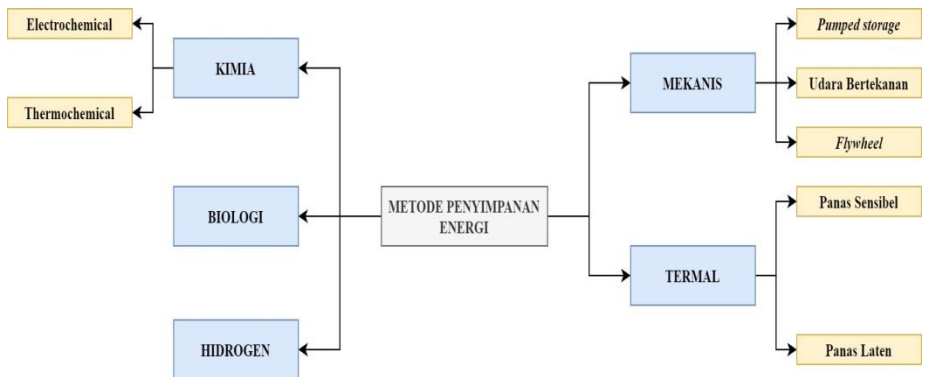
Pada banyak sistem energi, penyimpanan energi sangatlah penting. Contoh paling sederhana adalah penyimpanan bahan bakar pada kendaraan. Jarak tempuh kendaraan sangat bergantung pada besarnya kapasitas penyimpanan. Desain dan ukuran penyimpanan disesuaikan dengan kebutuhan kendaraan tersebut. Sangatlah tidak mungkin menyimpan sejumlah kecil bahan bakar untuk kendaraan seperti pesawat, kapal laut, bus dan truk yang memang didesain untuk melakukan jarak tempuh yang jauh dengan daya angkut yang besar. Sebaliknya, sangatlah tidak ekonomis menggunakan penyimpanan yang besar untuk kendaraan kecil seperti sepeda motor.

Penyimpanan energi juga digunakan pada sistem *stationer*, seperti pembangkit listrik tenaga uap dan nuklir. Besarnya kapasitas bahan bakar (baik minyak, gas dan batu bara untuk pembangkitan tenaga uap, maupun jumlah penyimpanan uranium sebagai bahan bakar atau *fuel* untuk sistem pembangkit tenaga nuklir). Hal ini sangat erat kaitannya dengan keekonomian dari sistem pembangkit untuk menjamin suplai energi listrik yang dihasilkan. Model penyimpanan energi *stationer* juga dapat dilihat pada perangkat elektronik yang menggunakan baterai. Kapasitas baterai disesuaikan dengan jenis perangkat yang digunakan. Sangatlah tidak logis menggunakan baterai untuk laptop pada perangkat telepon genggam, dan juga sebaliknya. Pada beberapa kasus sederhana ini terlihat, penyesuaian kapasitas penyimpanan berdasarkan kebutuhan.

Pada aspek yang lebih rumit, model penyimpanan juga digunakan untuk menyesuaikan kenaikan permintaan secara tiba-tiba. Sebagai contoh adalah model pembangkitan listrik yang menggunakan prinsip *base* dan *peak generation*. *Base generation* digunakan untuk membangkitkan

listrik sesuai dengan kebutuhan dasar yang sudah diperhitungkan secara seksama, misalnya untuk durasi pagi sampai sore hari. Untuk *peak generation*, sistem ini digunakan hanya untuk memenuhi kebutuhan listrik pada puncak pemakaian, misalnya dari pukul 5 sore sampai 11 malam. Sama halnya dengan baterai kendaraan *hybrid*, terdapat dua jenis baterai yang digunakan yakni baterai untuk keperluan utilitas (penerangan, penggerak mula, dll) dan baterai untuk penggerak motor listrik. Masing-masing baterai memiliki fungsi dan peranan masing-masing pada kendaraan tersebut meskipun keduanya sama-sama menyimpan listrik.

Terdapat beragam metode penyimpanan sebagaimana yang diperlihatkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram metode penyimpanan energi [10]

Banyaknya ragam penyimpanan energi menandakan bahwa sistem penyimpanan energi begitu penting pada suatu sistem energi. Masing-masing metode memiliki keunggulan, karakteristik dan cara kerja tersendiri yang tidak bisa ditukar atau digantikan. Sebagai contoh, aplikasi sistem penyimpanan energi termal digunakan untuk memanaskan air, tentu fungsi ini tidak bisa langsung digantikan penyimpanan mekanis (misalnya *flywheel*). Artinya, setiap metode penyimpanan dan penggunaannya memiliki tujuan spesifik.

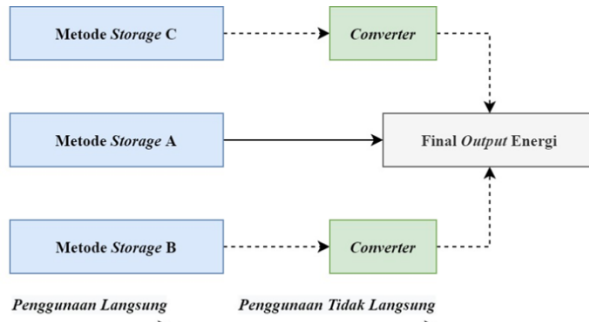
Beberapa gambaran umum tentang metode penyimpanan energi dijabarkan sebagai berikut:

- a. Penyimpanan energi secara mekanis dan hidrolis (baik melalui *pumped storage* maupun udara bertekanan) biasanya digunakan pada unit pembangkit listrik yang memanfaatkan kelebihan energi yang diproduksi dengan cara mengalirkannya ke pompa untuk mengangkat air pada suatu reservoir atau menekan udara pada suatu tabung bertekanan
- b. *Flywheel* digunakan untuk menyimpan energi dalam bentuk putaran
- c. Penyimpanan energi dalam bentuk produksi hidrogen dilakukan pada area gas buang atau memanfaatkan elektrolisis
- d. Penyimpanan energi *thermochemical* digunakan dengan memanfaatkan sifat *reversible* (mampu balik) suatu reaksi kimia untuk menghasilkan sejumlah panas (*endothermic* pada proses *charging*, *exothermic* pada proses *discharging*)
- e. *Electrochemical* merupakan teknologi yang cukup terbukti efisien dalam menyimpan energi, namun penelitian lebih lanjut masih dilakukan untuk menurunkan rasio berat terhadap kapasitas (*weight-to-storage ratio*)
- f. Penyimpanan energi termal baik dalam bentuk sensibel (biasanya air atau batuan) maupun kalor laten (parafin dan garam cair misalnya) digunakan untuk menyerap limbah panas industri dan beberapa aplikasi solar *thermal system*.

Terlihat banyaknya ragam metode penyimpanan dan pengembangan berkelanjutan yang dilakukan untuk menghasilkan metode yang terbukti efektif, murah dan tentunya ramah lingkungan. Terlebih dengan semakin canggihnya model produksi energi baru terbarukan, maka pengembangan metode *storage* akan terus mengikut sesuai dengan tren yang ada.

D. HIBRIDISASI SISTEM PENYIMPANAN ENERGI

Hibridisasi metode penyimpanan pada suatu sistem sangat mungkin dilakukan namun memerlukan beberapa perlengkapan tambahan, bergantung pada target akhir energi yang diinginkan. Model ini direpresentasikan melalui Gambar 3.3.



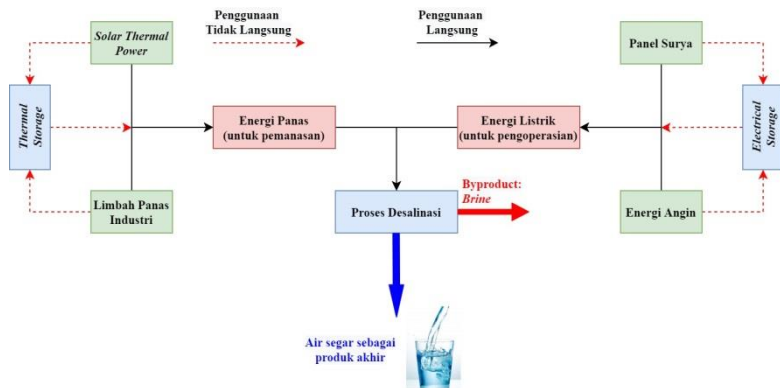
Gambar 3.3 Contoh model hibridisasi penyimpanan energi [12]

Seperti terlihat pada Gambar 3.3., gabungan beberapa metode *storage* dapat digunakan dengan konsep hibridisasi [13]. Namun, ada beberapa metode *storage* yang tidak dapat langsung menghasilkan final *output* energi yang diharapkan, melainkan butuh unit *converter* untuk merubah energi awal dari media *storage* menjadi energi yang diharapkan (final *output* energi). Contoh hibridisasi adalah penggunaan media penyimpanan baterai, *pumped storage* dan penyimpanan termal untuk membangkitkan listrik. Baterai (meskipun energi awalnya diperoleh dari panel surya atau metode lainnya) secara langsung dapat menghasilkan listrik (metode *storage* A), lalu untuk melengkapi sistem ini, *pumped storage* dan penyimpanan termal digunakan juga. *Pumped storage* membutuhkan turbin untuk menghasilkan listrik dan penyimpanan termal membutuhkan mesin uap atau (bisa juga mesin *Stirling* untuk pembangkitan kecil) untuk menghasilkan listrik. Turbin dan mesin uap merupakan *converter* untuk menghasilkan final *output* energi, yakni energi listrik.

Hibridisasi pada prinsipnya untuk meningkatkan nilai reliabilitas, kapasitas dan tentunya ekonomi dari sistem pembangkitan energi. Mengacu kepada hal ini, maka hibridisasi juga bisa difungsikan dari beberapa metode pembangkitan yang dihubungkan dengan media penyimpanan sesuai dengan karakteristik pembangkitan untuk mencapai satu final *output* energi yang sama [14]. Masing-masing sistem energi memiliki kelemahan dan kekurangan, khususnya untuk sistem energi terbarukan yang bersumber dari matahari dan angin, maka untuk

menaikkan faktor kapasitas dari sistem tersebut, hibridisasi diperlukan. Contohnya adalah menggabungkan sistem pembangkit panel surya dengan turbin angin pada satu area ataupun pada satu wilayah penyimpanan yang sama.

Sebagai tambahan, final *output* energi tidak harus selalu didefinisikan dengan energi listrik. Beberapa sistem energi membutuhkan energi dalam bentuk panas, contoh paling mudah adalah pemanasan air untuk industri dan desalinasi air laut. Pada kasus desalinasi air laut menggunakan metode pemanasan, hibridisasi pembangkit digunakan untuk memaksimalkan proses pemanasan air dengan menggunakan bahan bakar fosil seminim mungkin atau bahkan tidak sama sekali. Konsep ini dapat diterapkan berdasarkan skema yang ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Hibridisasi produksi air bersih melalui termal desalinasi [15]

Skema kerja pada Gambar 3.4. menunjukkan ada dua metode penyimpanan yakni termal dan listrik. Keduanya diperoleh dari sumber energi terbarukan (dan juga limbah kalor industri). Hibridisasi yang kuat memungkinkan untuk sistem beroperasi pada malam hari dan juga minim (atau tidak sama sekali) menggunakan sumber energi fosil. Pada kasus di atas, maka air yang diproduksi akan disebut sebagai air rendah karbon yang berarti proses produksi air tersebut tidak menghasilkan banyak emisi gas buang. Sebagai catatan tambahan, meskipun seluruh sistem yang digunakan tidak menggunakan energi fosil, namun tetap dalam distribusi air, pengemasan dan lain-lain pasti akan melibatkan sumber energi fosil, sehingga tidak dapat dikatakan *water zero carbon* (Air tanpa karbon).



PARAMETER OPERASI PENYIMPANAN ENERGI

A. PEMAHAMAN TENTANG PARAMETER OPERASI PENYIMPANAN ENERGI

Sebagai suatu kesatuan unit energi, penyimpanan energi memiliki nilai-nilai tersendiri yang menjadi tolak ukur untuk proses desain, penggunaan dan juga asesmen rencana penggunaan. Nilai parameter ini sangat penting untuk diketahui dari suatu media penyimpanan energi karena akan berpengaruh terhadap rencana aplikasi dan juga modal (*capital cost*) yang dibutuhkan. Sebelum masuk lebih mendalam, perhatikan dua ilustrasi di bawah ini untuk memberikan pemahaman mendasar tentang parameter operasi penyimpanan energi.

a. Contoh Kasus pada Baterai Mobil

Baterai mobil (aki) yang dijual di pasaran umumnya dikategorikan berdasarkan besarnya kapasitas penyimpanan dan jenis baterai. Untuk jenis baterai, umumnya yang dijual adalah jenis aki basah dan aki kering. Pada poin ini, untuk jenis baterai tidak menjadi soal karena sama-sama memiliki parameter mendasar yang paling penting, yakni tegangan kerja sama-sama 12 VDC (aktualnya adalah 12.4–12.6 VDC karena 1 sel baterai menghasilkan tegangan berkisar antara 2.07–2.1 VDC dan baterai menggunakan 6 sel). Indikator umum yang paling sering digunakan adalah nilai AH (*Ampere–Hour*) sebagai indikator kapasitas dari baterai tersebut.

Pada masyarakat umum, nilai AH hanya digunakan untuk menentukan kapasitas baterai saja, semakin tinggi nilai AH maka semakin tinggi kapasitas baterai tersebut. Contoh untuk kendaraan ringan (minibus) biasanya menggunakan baterai 12V–40AH dan untuk kendaraan besar (truk misalnya) adalah 12V–100AH. Nilai kapasitas untuk baterai 12V–40AH adalah 480 WH (*Watt–Hour*) dan nilai kapasitas untuk baterai 12V–100AH adalah 1,200 WH. Untuk yang lebih spesifik, nilai baterai kendaraan tidak hanya dinilai dari nilai AH saja, namun ada beberapa parameter tambahan yang harus diketahui, yakni:

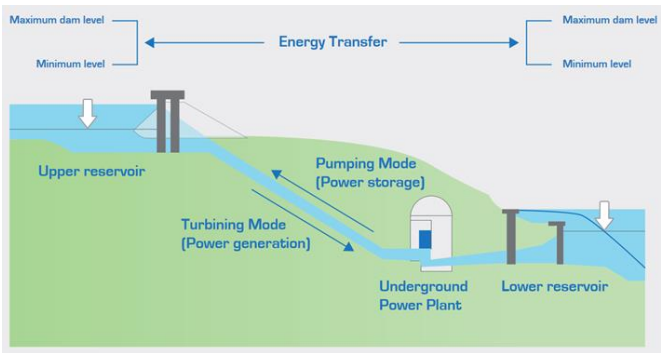
1. *Cold Cranking Ampere* (CCA): merupakan nilai unjuk kemampuan baterai yang terisi penuh dalam mengeluarkan listrik yang disimpan (*discharge*) pada kondisi dingin (pada suhu relatif -17.8 °C) selama 30 detik
2. *Reserve Capacity* (RC): menunjukkan kemampuan kapasitas cadangan yang mampu baterai suplai pada kondisi tidak diisi atau ada kegagalan pada baterai
3. *Ampere Rating* (AR): merupakan poin terpenting dari baterai, karena terkait kemampuan maksimal mensuplai arus maksimal yang umumnya digunakan untuk menggerakkan sistem penggerak mula. Bergantung jenis dan kapasitas baterai, nilai AR bervariasi antara 300–1000 *Ampere*. Semakin besar ukuran aki, maka kapasitas AR akan semakin besar. Hal inilah yang mendasari kenapa aki truk atau kendaraan besar menggunakan aki 12V–100AH. Sebagai gambaran, motor starter untuk kendaraan minibus membutuhkan daya sekitar 1.2 kW dan motor starter untuk kendaraan besar bisa sampai 9 kW. Untuk mendapatkan daya sebesar 9 kW dengan tegangan 12 VDC, maka paling tidak dibutuhkan hingga 750 *Ampere*.

Nilai AH, CCA, RC dan AR merupakan parameter operasi dari baterai [16]. Meskipun pada pandangan umum nilai ini tidak terlalu diperhatikan, namun pada bidang spesifik, misalnya ilmu teknik, keseluruhan nilai tersebut sangat penting. Nilai parameter disesuaikan dengan kebutuhan dari penggunaan. Misalnya, tidak mungkin menggunakan aki untuk sepeda motor (biasanya 5AH) untuk minibus (biasanya 40AH). Masih banyak detail

baterai lagi yang perlu diperhatikan seperti tahanan internal, *depth of discharge* (DOD), dll [17].

b. Contoh Kasus pada *Pumped Storage*

Pumped storage merupakan metode penyimpanan dengan menaikkan ketinggian air pada suatu reservoir untuk proses *charging*. Air yang disimpan pada reservoir memiliki energi potensial dan dinyatakan pada kondisi *storing*. Saat dibutuhkan, air yang disimpan akan dialirkan kembali untuk menggerakkan turbin (*discharging*). Turbin yang digunakan memiliki dua mode fungsi yakni *pumping mode* saat *charging* dan *turbining mode* saat *discharging*. Ilustrasi sederhana diperlihatkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Ilustrasi *pumped storage* [18]

Contoh kasus pada *pumped storage* lebih kompleks dibandingkan dengan contoh kasus pada baterai. Sebagai sistem yang relatif besar (baik untuk dimensi dan kapasitasnya) maka detail teknis dari *pumped storage* disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Performa dari *pumped storage* EASE-EERA [18]

<i>Power Range</i> *	10 MW – 3.0 GW
<i>Energy range</i>	Hingga 100 GWh
Durasi pelepasan energi (<i>discharge time</i>)	Beberapa menit hingga 10 jam
Usia siklus (<i>cycle life</i>)	Secara teknis tidak terbatas
Usia pemakaian	Di atas 80 tahun

Waktu reaksi	Beberapa detik hingga beberapa menit
Efisiensi **	70 – 85%
<i>Energy (power) density</i>	0.5 – 3 Wh/kg
<i>Capital Expenditure (CAPEX): energi</i>	40 – 150 €/kWh
<i>Capital Expenditure (CAPEX): power</i>	400 – 1,500 €/kW

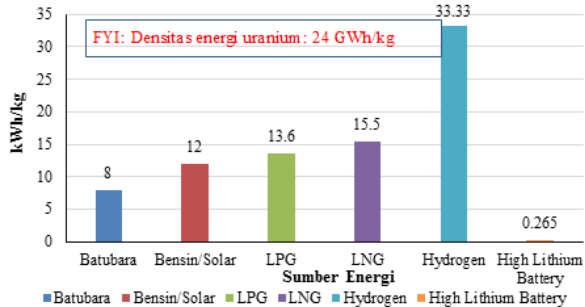
* Tanda bintang untuk *power range* dimaksudkan untuk memberikan informasi bahwa pada prinsipnya tidak ada batasan untuk nilai ini. Semakin besar ukuran reservoir, maka semakin besar ukuran *power range*, hanya saja untuk kemudahan dalam penulisan teknis dibuat pada *range* tersebut. Perubahan *power range* akan menyebabkan komponen lain juga berubah.

** Tanda ini dimaksudkan untuk menunjukkan efisiensi siklus, bukan efisiensi dari mesin pompa dan turbin.

Pada kasus yang lebih riil, detail teknis diberikan lebih spesifik karena sangat diperlukan dalam proses desain dan juga penentuan biaya. Beberapa detail teknis yang penting sebagai parameter operasi dari penyimpanan energi adalah kapasitas, *power*, *efficiency*, *storage period*, *cost*, *charge and discharge time*. Masing-masing parameter akan dibahas secara spesifik pada sub bab berikutnya.

B. KAPASITAS

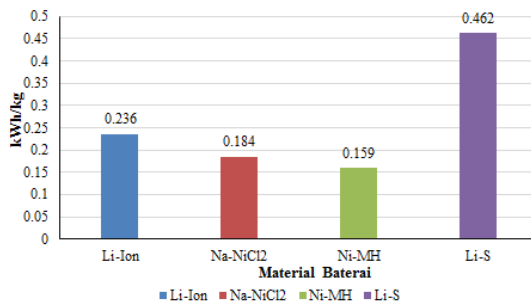
Secara sederhana dapat diartikan sebagai total energi yang dapat disimpan pada media penyimpanan energi. Kapasitas bergantung terhadap proses penyimpanan, media atau metode yang digunakan dan terakhir adalah ukuran dari sistem itu sendiri. Pada kasus penyimpanan energi, kapasitas tidak hanya bergantung pada ukuran dari sistem, namun juga bergantung kepada proses penyimpanan serta media dan metode yang digunakan untuk menyimpan energi. Jika kapasitas secara langsung hanya dihubungkan dengan ukuran, maka pola yang ditunjukkan akan linier yakni semakin besar ukuran (dimensi) penyimpanan, maka kapasitas juga akan semakin besar. Perhatikan Gambar 4.2. tentang perbandingan antara beberapa jenis nilai energi per satuan massa (kg).



Gambar 4.2 Perbandingan densitas energi [10]

Penyimpanan 1 kg hidrogen jauh lebih banyak memiliki energi dibandingkan dengan menyimpan 4 kg batu bara. Namun, apakah menyimpan hidrogen sama dengan menyimpan batu bara? Tidak. Penyimpanan hidrogen rumit, membutuhkan beberapa perlengkapan khusus, sedangkan batu bara dapat dengan mudah disimpan di udara terbuka. Pada kasus ini, jelas perbandingan kapasitas tidak hanya didefinisikan berdasarkan ukuran semata, namun juga melibatkan beberapa aspek lainnya.

Contoh yang cukup jelas untuk menjelaskan kapasitas adalah pada penyimpanan energi listrik melalui metode *electrochemical*. Metode *electrochemical* merupakan metode paling umum dan maju untuk menyimpan energi listrik. Seluruh baterai listrik di pasaran umum menggunakan metode ini, baik untuk aki basah, aki kering sampai baterai *lithium*. Gambar 4.3. menunjukkan perbandingan densitas energi baterai yang digunakan pada kendaraan listrik.



Gambar 4.3 Perbandingan densitas energi baterai kendaraan listrik [19]

Massa yang dijadikan perbandingan adalah massa akhir dari baterai. Terlihat bahwa ragam jenis baterai memiliki densitas energi yang berbeda. Tentu, baterai Li-S (*Lithium–Sulfur*) pasti akan diminati karena memiliki densitas tertinggi. Namun, parameter operasi lain perlu diperhatikan juga (khususnya untuk biaya dan usia pakai). Tabel 4.2. menyajikan parameter detail dari beragam jenis baterai yang beredar dipasaran umum.

Tabel 4.2 Perbandingan parameter berbagai baterai umum di pasaran [20]

	Energi Spesifik (WH/kg)	Daya Spesifik (W/kg)	Tegangan Sel (V)	Siklus	Usia (Tahun)	DOD (Maksimal)	Laju Self-Discharge	Efisiensi (%)
<i>Lead-Acid</i>	35–50	150–400	2.1	50–1,000	5 tahun	20–80 %	2–8%/, hingga 20–30%/bulan	75–85%
<i>Nickel-Iron</i>	50–60	80–150	1.5	2,000	20 tahun	80 %	20–40%/bulan	
<i>Nickel-Cadmium</i>	30–60	80–150	1.2	1,000–50,000	10–15 tahun	60–80 %	5–15%/bulan	60–70%
<i>Nickel-Hydrogen</i>	50	220	1.4	1,500–6,000	15 tahun	–	Sangat tinggi kecuali pada suhu rendah	–
<i>Nickel-Metal-Hydride</i>	60–80	200–300	1.2	300–600	2–5 tahun	–	15–25%/bulan	–
<i>Nickel-Zinc</i>	70–100	170–260	1.6	Hingga 500	–	100 %	< 20%/bulan	–
<i>Lithium-Ion</i>	80–180	200–1000	3.05; 4.2	3,000	5+ tahun	100 %	2–10%/bulan	–
<i>Sodium-Sulfur</i>	150–240	230	2.71	2,500–40,000	–	100 %	–	86–89%
<i>ZEBRA</i>	90–120	130–160	2.58	–	–	–	–	–
<i>Vanadium Redox Flow</i>	0–30	100	1.2	10,000	7–15 tahun (estimas)	100 %	–	85%
<i>Zinc-Bromine Flow</i>	65–85	90–110	1.8	2,000	–	100 %	–	75–80%
<i>Zinc-Air</i>	200	100	1.6	300	–	–	–	50%

Melihat detail parameter pada Tabel 4.2., maka jelas dinyatakan banyak poin yang menjadi pertimbangan dalam menggunakan dan mengembangkan baterai. Seluruh parameter menjadi poin penting dalam aspek teknis karena akan banyak terkait dengan kemampuan dari aplikasi baterai tersebut dan tentunya, biaya pada *end-user* (pengguna akhir).

C. POWER

Kembali ke definisi dari *power* (atau daya dalam Bahasa Indonesia) yakni banyaknya energi yang dapat dikonversi persatuan waktu. Dalam hal parameter operasi penyimpanan energi, definisi *power* dibuat lebih detail yakni seberapa cepat energi yang tersimpan dapat dilepaskan kembali saat *discharging* dan diserap kembali saat *charging*. Mengacu kepada hal tersebut, maka terdapat *power* untuk *discharging* (dinotasikan dengan P_{dch}) dan *power* untuk *charging* (P_{ch}). Tiap penyimpanan energi dan material yang digunakannya memiliki karakteristik tersendiri sehingga jarang ditemui media penyimpanan yang memiliki nilai P_{dch} dan P_{ch} yang sama.

Pada sistem penyimpanan energi termal menggunakan sifat sensibel, secara teori bisa dinyatakan memiliki *power* yang sama untuk *charging* dan *discharging*. Teori tersebut diambil dari prinsip asas Black (ditemukan oleh Joseph Black) yang secara prinsip menyatakan benda yang mudah menyerap panas akan mudah juga untuk melepas panas [21]. Sehingga, logisnya adalah *power* untuk *charging* dan *discharging* akan sama pada kasus penyimpanan energi termal. Pada aktualnya, tetap terdapat perbedaan karena *power* melibatkan komponen-komponen lain yang digunakan untuk mengekstraksi energi dari penyimpanan dan juga untuk menyuplai kembali energi ke media penyimpanan. Perhatikan Tabel 4.3. terkait contoh detail teknis untuk beberapa jenis baterai listrik.

Tabel 4.3 Detail teknis beberapa baterai listrik [22]

Spesifikasi	Lead-Acid	NiCd	NiMH	Li-Ion		
				Kobalt	Mangan	Fosfat
Spesifik densitas energi (Wh/kg)	30–50	45–80	60–120	150–190	100–135	90–120
Tahanan internal (mΩ)	< 100 (ukuran 12 V)	100–200 (6V)	200–300 (6V)	150–300 (7V)	25–75 (per sel)	25–50 (per sel)
Usia siklus (80% discharge)	200–300	1,000	300–500	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000
Durasi <i>charging</i> cepat (jam)	8–16	1	2–4	2–4	< 1	< 1
Toleransi <i>overcharge</i>	Tinggi	Menengah	Rendah	Sangat rendah		
<i>Self-discharge</i> /bulan *	5%	20%	30%	< 10%		
Tegangan sel	2 V	1.2 V	1.2 V	3.6 V	3.8 V	3.3 V
Tegangan <i>cutoff charge</i> **	2.4, float 2.25	Pengisian penuh ditandai oleh tegangan tertentu		4.2		3.6
Tegangan <i>cutoff discharge</i> **	1.75	1.00		2.5 – 3.0		2.8
Suhu pengisian	–20 – 50 °C	0 – 50 °C		0 – 45 °C		
Suhu <i>discharge</i>	–20 – 50 °C	–20 – 65 °C		–20 – 60 °C		
Perawatan	3 – 6 bulan	30 – 60 hari	60–90 hari	Tidak dibutuhkan		
Keamanan	Suhu relatif stabil	Suhu relatif stabil, dibutuhkan proteksi <i>sikring</i>		Perlindungan rangkaian bersifat harus		
Digunakan sejak	Akhir 1800	1950	1990	1991	1996	1999
<i>Toxicity</i>	Sangat tinggi	Sangat tinggi	Rendah	Rendah		

Terlihat pada poin durasi pengisian cepat, tiap jenis baterai memiliki nilai berbeda. Hal ini sangat dipengaruhi oleh karakteristik dari material yang digunakan. Pada penyimpanan energi, metode penyimpanan energi yang digunakan juga memberikan pengaruh terhadap *power rate*. Contoh lain adalah pada metode *pumped storage*. Durasi Pch *pumped storage* akan lebih lama dibandingkan dengan Pdch. Hal ini terjadi karena dibutuhkan usaha lebih untuk mengangkat air ke tempat yang lebih tinggi saat *charging*. Nilai Pch pada prinsipnya bisa saja dimaksimalkan mendekati nilai Pdch, namun ini hanya berdampak pada kerugian teknis

dan nilai efisiensi karena harus menggunakan peralatan yang memiliki kemampuan lebih tinggi (*high-rate pump*) dan tentunya dibutuhkan biaya ekstra juga untuk hal ini. Bergantung pada aspek mana yang lebih dibutuhkan, nilai P_{dch} dan P_{ch} dapat disesuaikan dengan kebutuhan. Pada kasus baterai *Lithium* untuk perangkat elektronik, tentu P_{ch} diharapkan bisa dilakukan secepat mungkin, hal ini yang umum disebutkan dengan baterai *Fast Charging*. Secara umum, P_{dch} lebih besar dibandingkan dengan nilai P_{ch} . Fenomena ini umumnya dijumpai pada metode penyimpanan *non-electrochemical*. Contoh dari fenomena tersebut dapat dengan jelas dijumpai pada metode penyimpanan berbasis *thermochemical*, misalnya pada metal *hydride*.

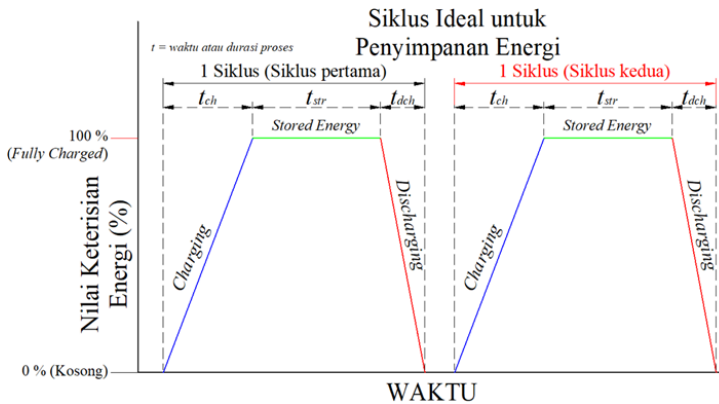
D. EFFICIENCY

Efisiensi secara umum dapat dilihat berdasarkan nilai yang keluar berapa dan nilai yang dibutuhkan untuk proses berapa, atau besarnya energi *output* dibandingkan dengan energi *input*. Jika suatu sistem membutuhkan energi 100 kJ dan berhasil mengeluarkan energi yang berguna sebesar 90 kJ, maka sistem tersebut memiliki efisiensi 90%. Konsep ini tetap berlaku pada aspek efisiensi di parameter operasi penyimpanan energi, namun memiliki batasan-batasan yang lebih detail dari hanya sekedar rasio energi masuk/keluar. Pada penyimpanan energi, nilai efisiensi dinyatakan sebagai rasio atau perbandingan besarnya energi yang diberikan ke pengguna dibandingkan dengan energi yang dibutuhkan untuk melakukan pengisian (*charging*) ke sistem. Hal ini juga harus memperhitungkan besarnya kehilangan energi selama proses penyimpanan (lihat bagian 2.2.3. *Energy Storage* dan Hukum Kedua Termodinamika) dan juga siklus *charging/discharging*. Kehilangan energi umumnya ditemui pada tiap metode dengan model sebagai berikut:

- a. Kerugian pada penyimpanan panas akibat adanya perpindahan panas alami dari media penyimpanan ke lingkungan
- b. Kerugian pada metode penyimpanan mekanis akibat adanya kerugian mekanis seperti gesekan antar partikel fluida kerja dengan dinding-dinding saluran, termasuk juga sisa fluida yang ada reservoir (khususnya *pumped storage*)

- c. Kerugian pada penyimpanan panas berbasis *thermochemical*, contohnya kerugian akibat *hysteresis losses* pada metal *hydride* dimana tidak semua hidrogen yang disimpan mampu dikeluarkan
- d. Kerugian minor pada penyimpanan *electrochemical* akibat adanya tahanan internal pada media penyimpanan

Poin yang cukup penting dikaji lebih lanjut pada aspek efisiensi adalah siklus kerja. Satu siklus kerja secara teoritis adalah proses *charging* dari nol sampai terisi penuh, proses penyimpanan, dan proses *discharging*. Gambar 4.4. memberikan skenario satu siklus teoritis ideal pada penyimpanan energi.



Gambar 4.4 Diagram kerja siklus penyimpanan energi

Satu siklus teoritis ideal penyimpanan energi pada Gambar 4.4. dapat tercapai apabila nilai *fully charged* (100%) dan nilai kosong (0%) dapat dicapai pada proses *charging* dan *discharging*. Siklus teoritis ideal juga menunjukkan bahwa pada siklus kedua dan seterusnya nilai-nilai tersebut dapat tercapai. Sayangnya, siklus teoritis ideal tidak dapat dicapai terus menerus. Terjadi penurunan nilai maksimal yang dapat dicapai saat *charging*, kenaikan kerugian nilai energi yang tersimpan dan kegagalan dalam melepas seluruh energi saat proses *charging*. Hal ini sangat umum ditemui, khususnya untuk metode penyimpanan *non-mekanis*.

Penurunan efisiensi terkait siklus disebabkan oleh degradasi material penyimpanan. Penurunan tersebut sangat umum dijumpai pada baterai listrik (*electrochemical*) dimana seiring waktu, kapasitas penyimpanan baterai akan menurun serta baterai tidak mampu menyimpan energi dalam jumlah yang lebih lama lagi saat *energy stored*. Nilai efisiensi berdasarkan siklus merupakan nilai penting dalam proses asesmen material dan metode penyimpanan. Sebagai contoh, penyimpanan *non-mekanis* memiliki usia siklus yang sangat panjang, sedangkan *electrochemical* cukup pendek. Terkait dengan penurunan efisiensi pada aspek siklus, hal ini akan berhubungan juga dengan pembahasan *storage period* dan *charging and discharging time*.

Karena terkait dengan usia pakai dari media penyimpanan energi, maka parameter siklus menjadi indikator penting yang sangat diperhatikan, khususnya untuk nilai keekonomisan dari sistem penyimpanan energi. Sebagai contoh, biaya penyimpanan energi listrik melalui *electrochemical* (baterai) untuk sistem energi baru terbarukan (misalnya angin dan panel surya) merupakan komponen biaya terbesar dari keseluruhan sistem [23]. Komponen biaya tersebut didasari pada perhitungan berikut:

- a. Usia pakai baterai;
- b. Penurunan performa baterai seiring berjalannya waktu;
- c. Kemampuan daur ulang baterai;
- d. Biaya perawatan.

Upaya yang sudah maju dilakukan adalah menghilangkan komponen biaya perawatan baterai, sehingga dikenal teknologi *maintenance free battery*. Kemampuan daur ulang juga dikembangkan sedemikian rupa sehingga dibuat beberapa skema investasi baterai seperti model *buyback* baterai lama dengan baterai baru.

Pengembangan material penyimpanan energi baru, khususnya untuk metode *electrochemical* dan penyimpanan kalor harus memperhatikan aspek siklus. Pendekatan yang dilakukan umumnya mencoba material yang dikembangkan pada beberapa siklus untuk melihat model penurunan performanya.

Lebih lanjut, untuk analisis *aging test* dapat dilakukan untuk memberikan kemudahan dalam proses pengujian [24]. Sebagai contoh, pengujian suatu baterai bisa mencapai 10,000 siklus, jika 1 siklus membutuhkan waktu 1 jam, maka untuk menguji material tersebut dibutuhkan waktu 10,000 jam atau setara dengan 416 hari, yang mana ini sangat tidak ekonomis. Hal inilah yang mendasari kenapa *aging test* diperlukan yakni untuk meminimalisir biaya pengujian material baru. Metode *aging test* yang dikembangkan saat ini melibatkan *software*, metode dan *apparatus* khusus, serta analisis numerik yang kuat dikenal dengan istilah *advanced aging test*.

E. STORAGE PERIOD

Storage period didefinisikan sebagai berapa lama energi tersebut disimpan. Nilai ini bervariasi, dari hitungan jam sampai hitungan bulan (khususnya untuk penyimpanan musiman). Perhitungan durasi penyimpanan bisa didasari pada rencana penggunaan maupun berapa lama energi dapat tersimpan pada media penyimpanan. Pada kasus baterai, terlihat adanya nilai *self-discharge* (Tabel 4.3.) yang berarti listrik yang tersimpan pada material penyimpanan akan keluar dengan sendirinya. Pada poin ini, jelas baterai model tersebut lebih cenderung digunakan untuk durasi penyimpanan yang sebentar. Perlu diketahui, *storage period* adalah berapa lama energi dapat disimpan di media penyimpanan, bukan berapa lama energi yang tersimpan dapat keluar dari media (nilai ini berkaitan dengan parameter berikutnya yakni *discharge time*).

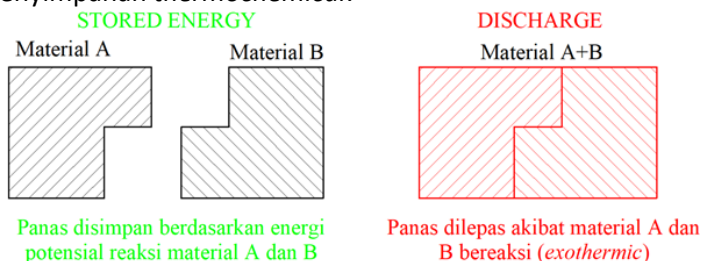
Poin yang cukup menarik adalah penyimpanan energi yang dapat dilakukan untuk jangka panjang atau dikenal dengan *seasonal storage* [25]. Energi yang disimpan umumnya adalah energi panas, oleh karenanya pembahasan terkait *storage period* akan difokuskan pada jenis energi ini. Penyimpanan energi termal berdasarkan waktu dapat dibagi ke dalam tiga kategori, yakni:

- a. *Short term storage*, biasanya digunakan untuk penyimpanan air hangat untuk kebutuhan 1 atau 2 rumah tangga.

- b. *Mid-term storage*, umumnya digunakan untuk pemanasan ruangan rumah dan juga pemanasan air untuk wilayah kecil tertentu (misalnya kompleks perumahan).
- c. *Long-term storage*, secara prinsip sama-sama digunakan untuk pemanasan air, namun ditujukan untuk waktu yang lebih lama dengan kapasitas yang besar.

Dengan beragamnya waktu penyimpanan, maka jelas dibutuhkan analisis yang mendalam terkait dengan upaya untuk meminimalisir kerugian energi saat proses penyimpanan. Pada poin ini, perencanaan lebih mendetail dibutuhkan untuk meminimalisir biaya, sehingga aspek analisis biaya perlu dimasukkan ke dalam proses perencanaan dan desain. Terlebih umumnya untuk aplikasi di atas metode penyimpanan menggunakan sifat sensibel dan kalor laten dari material penyimpanan, yang berpeluang memiliki kerugian yang tinggi seiring adanya perbedaan suhu antara media penyimpanan dengan suhu sekitar.

Sebagai tambahan terkait dengan penyimpanan energi termal pada aspek *storage period*, metode penyimpanan *thermochemical* merupakan metode penyimpanan paling efektif dari aspek *storage period* karena nilai kerugian yang sangat kecil [26]. Hal ini dapat dicapai karena energi panas disimpan dalam bentuk reaksi, sehingga tidak diperlukan isolator untuk menghindari kerugian panas. Perhatikan skema gambar 4.5. untuk prinsip metode penyimpanan *thermochemical*.



Gambar 4.5 Prinsip sederhana penyimpanan metode *thermochemical*

Selama material A dan B tidak bereaksi, maka panas tidak akan dikeluarkan oleh sistem. Ketika material A dan B bereaksi membentuk material AB, panas reaksi (*exothermic*) akan dilepaskan. Hal ini yang

menyebabkan pada metode *thermochemical*, dimungkinkan untuk mencapai *storage period* lebih dari 20 tahun tanpa ada kerugian berarti. Hanya saja, metode *thermochemical* masih dalam tahap *research and development* sehingga secara biaya masih tergolong sangat mahal.

F. COST

Biaya (*cost*) merujuk kepada acuan kapasitas (\$/kWh atau \$/Wh untuk kapasitas yang lebih kecil) maupun acuan daya (\$/kW). Parameter biaya bergantung kepada banyak aspek, yakni:

- Biaya investasi awal.
- Biaya perawatan dari sistem pendukung media penyimpanan.
- Usia pakai (banyaknya siklus).

Pada sistem penyimpanan skala besar, keseluruhan komponen biaya tersebut diperhitungkan secara seksama, khususnya terkait dengan usia pakai. Sebagaimana yang telah dibahas pada Bagian 4.4., usia pakai menentukan besarnya biaya energi dari sistem penyimpanan.

Pada sistem yang lebih kecil, umumnya biaya energi lebih dipengaruhi oleh kemudahan penggunaan dan teknologi penyimpanan. Hal ini dapat dilihat dengan jelas pada baterai sebagai media penyimpanan listrik. Perhatikan Tabel 4.4. yang menyajikan harga beragam baterai kapasitas kecil yang umum digunakan oleh masyarakat umum. Harga mengacu kepada kapasitas (Rp./Wh) dengan pengambilan harga berdasarkan harga *end-user* yang ada di *marketplace*.

**Tabel 4.4 Perbandingan harga beragam jenis baterai
(harga pasaran umum, Mei 2021)**

Aplikasi	Kapasitas (Wh)	Harga (Rp.)	Biaya (Rp./Wh)
Aki (100 AH)	1,200	2,000,000	1,666.67
Aki (40 AH)	480	800,000	1,666.67
Aki (6AH)	72	175,000	2,430.56
Laptop	52.5	600,000	11,428.57
Telepon Genggam	4	950,000	237,500

Terlihat dengan jelas bahwa semakin kecil kapasitas, justru harga semakin mahal. Hal inilah yang menjadi keunikan sendiri dari sistem penyimpanan energi, khususnya untuk baterai listrik elektronik, karena tujuan aplikasinya yang sangat spesifik dan mahal serta dari segi ukuran yang relatif kecil, mengharuskan untuk membuat desain baterai yang kompak dan memiliki siklus yang panjang.

Penyimpanan energi listrik memang memberikan biaya yang sangat tinggi. Sebagai perbandingan, biaya listrik rumahan (tegangan AC) umumnya berkisar RP. 1,500/kWh yang berarti biayanya hanya 1.5 Rp./Wh. Biaya yang teramat murah dibandingkan dengan Tabel 4.4. Namun, perlu diingat bahwa energi listrik rumah yang melalui saluran listrik mengharuskan penggunaan berada pada satu titik yang tetap (diam) dan tidak bisa digunakan untuk aplikasi *mobile*, di sisi lain, listrik ini tidak dapat disimpan dan harus langsung digunakan sehingga logis bahwa harganya lebih murah dibandingkan listrik yang disimpan dan memungkinkan untuk digunakan pada banyak tempat.

Pada kasus penyimpanan energi dengan kapasitas yang lebih besar, umumnya biaya energi menjadi lebih kecil. Hal ini terjadi karena energi yang tersimpan tadi dapat dijual lebih banyak, dan sumber energinya bersifat tetap atau ditampung pada area tertentu, yang pembuatannya relatif lebih mudah, sehingga biaya investasi menjadi lebih kecil.

Catatan

Pada prinsipnya, penyimpanan energi yang bersifat *mobile* tidak bisa dibandingkan secara langsung dengan penyimpanan energi yang bersifat *stationer*. Tabel di atas hanya memberikan perspektif betapa harga penyimpanan energi dipengaruhi oleh tujuan spesifik aplikasi yang kadang tidak termasuk dalam komponen biaya analisis.

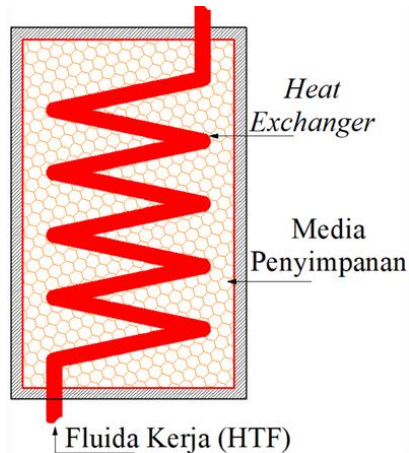
G. CHARGE AND DISCHARGE TIME

Parameter terakhir untuk operasi penyimpanan energi adalah *charge and discharge time* yang secara langsung berhubungan dengan kemampuan sistem untuk mengisi dan melepaskan energi dalam sejumlah waktu tertentu. Parameter ini berkaitan erat dengan efisiensi dan *power*. Untuk mengisi energi dan melepaskannya kembali, sistem penyimpanan energi terikat pada variabel waktu. Durasi yang dibutuhkan oleh sistem

penyimpanan energi pada awal pemakaian merupakan kemampuan yang paling cepat karena sistem beroperasi pada kondisi ideal sehingga *power* yang dihasilkan mampu mencapai titik maksimal. Seiring dengan berulangnya pemakaian, *cycle*, maka otomatis akan terjadi penurunan performa, sehingga perhitungan detail diperlukan untuk dapat memprediksi kemampuan *charging* dan *discharging* pada kondisi ideal dan penurunan berdasarkan *cycle*.

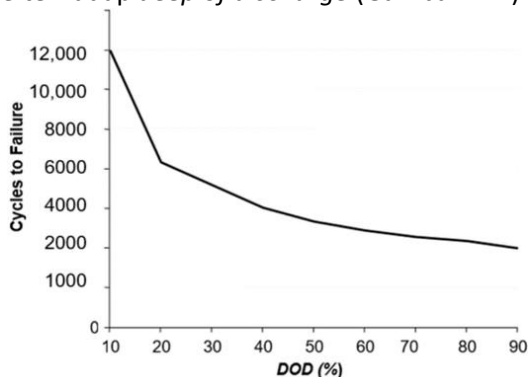
Secara umum, sistem penyimpanan energi yang menggunakan metode mekanis tidak terlalu dipengaruhi oleh penurunan *cycle* sehingga durasi *charging* dan *discharging* dapat tetap dijaga dengan maksimal. Sebagai contoh pada metode *pumped storage* dan udara bertekanan, media penyimpanan, dalam hal ini air (*water*) untuk *pumped storage* dan udara untuk *compressed air*, tidak mengalami perubahan signifikan. Perlengkapan yang dibutuhkan untuk mengisi dan mengekstraksi energi juga dapat dengan mudah diprediksi performanya, sehingga parameter operasi *charging* dan *discharging time* dapat diperoleh dengan cukup akurat tanpa perlu mempertimbangkan jumlah *cycle*.

Hal berbeda ditunjukkan oleh sistem penyimpanan kalor dan *electrochemical* yang sangat bergantung kepada *cycle*. Pada kasus penyimpanan kalor, *charging* dan *discharging time* dipengaruhi oleh desain awal (alat penukar kalor atau *heat exchanger*) sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.6. Pengaruh dari *heat exchanger* tidak terlalu besar dan lebih disebabkan oleh jenis fluida kerja yang digunakan pada model yang menggunakan fluida pemindah panas (*heat transfer fluid*) dan faktor pengotoran (*fouling factor*) dari desain *heat exchanger* [27]. Pengaruh paling besar disebabkan oleh media penyimpanan energi. Misalnya untuk media berbasis parafin pada metode penyimpanan panas basis kalor laten. Semakin banyak *cycle* kerja dari parafin, maka ada penurunan performa yang disebabkan oleh sifat awal material tersebut, seperti fenomena *subcooling* dan *supercooling* [28].



Gambar 4.6 Desain *heat exchanger* pada penyimpanan energi kalor

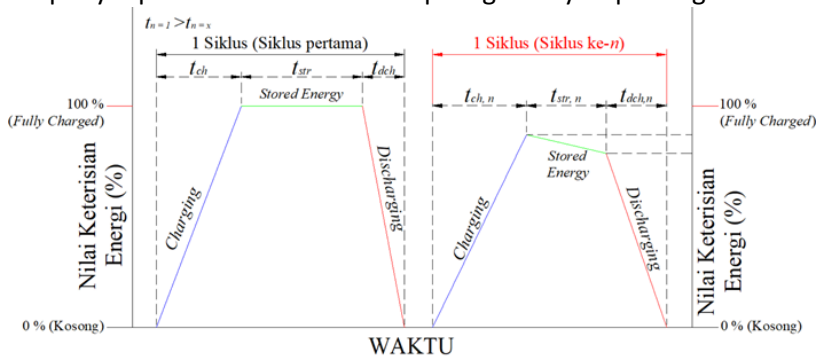
Sistem penyimpanan *electrochemical* sangat dipengaruhi oleh material yang digunakan sebagai media penyimpanan. Efek dari *cycle* terhadap *charging* dan *discharging time* sangat dirasakan dan mudah sekali diketahui oleh masyarakat umum. Misalnya, baterai telepon genggam yang setelah pemakaian beberapa tahun mudah sekali habis baterainya dan dibutuhkan waktu yang lebih untuk mengisi ulang baterai tersebut. Hal yang sama juga dapat diamati pada baterai kendaraan (aki) yang setelah digunakan sekian lama, maka baterai tersebut sudah tidak dapat diisi dengan maksimal lagi. Hubungan tersebut digambarkan melalui grafik banyaknya *cycle* terhadap *deep of discharge* (Gambar 4.7.).



Gambar 4.7 Cycle vs *Deep of Discharge* pada baterai *lead acid* [29]

Hubungan secara langsung antara *cycle* dan durasi pengisian dan pelepasan energi dapat diamati pada Gambar 4.8. Durasi yang dibutuhkan pada siklus ke- n (banyak siklus) untuk *charging*, *storing* dan *discharging* berubah semua dibandingkan dengan siklus pertama. Meskipun terlihat durasi pada siklus ke- n lebih cepat dibandingkan dengan siklus pertama ($t_n = 1 > t_n = x$) hal ini bukan menandakan performa yang lebih baik, namun sebaliknya yakni penurunan performa.

Jika diperhatikan dengan seksama, maka jumlah energi yang disimpan menjadi lebih sedikit karena waktu *charging* lebih cepat yang disebabkan material penyimpanan sudah tidak mampu lagi menyerap energi listrik.



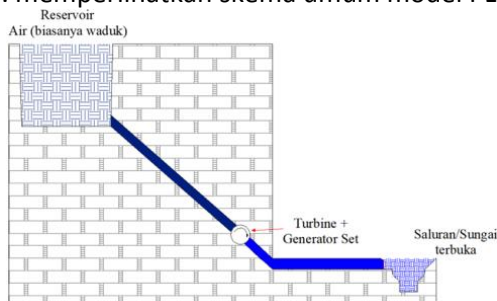
Gambar 4.8 Pengaruh *cycle* terhadap *charging* dan *discharging* time

Hal ini sangat umum diamati ketika baterai cepat penuh namun cepat habis juga. Poin berikutnya adalah kerugian energi selama proses penyimpanan yang cukup terlihat jelas dibandingkan dengan siklus pertama. Hal ini juga dapat diamati pada kasus baterai perangkat elektronik ketika baterai tidak digunakan namun sering habis dengan sendirinya.

PENYIMPANAN ENERGI MEKANIS

A. PUMPED STORAGE

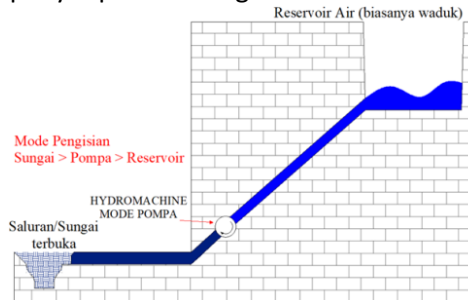
Pumped storage bisa dikategorikan sebagai *hydrostorage* karena memiliki prinsip kerja yang sama. Sebagaimana umumnya Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), *pumped storage* memanfaatkan energi potensial dari air yang ditampung pada ketinggian tertentu (*head*). Air yang ada ditampung kemudian dialirkan melalui saluran *penstock* untuk diarahkan menggerakkan turbin. Energi kinetik dari air yang mengalir diubah menjadi gerak turbin untuk kemudian menggerakkan generator dan menjadi energi listrik. Gambar 5.1. memperlihatkan skema umum model PLTA.



Gambar 5.1 Skema umum sistem PLTA [30]

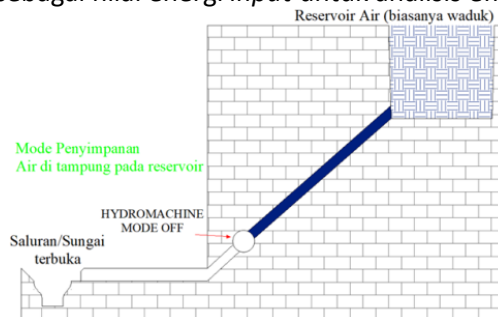
Pada PLTA, air yang di reservoir diperoleh berdasarkan fenomena alam yang terjadi secara alami, sehingga tidak diperlukan energi masukan untuk menaikkan air lebih tinggi. Pada kasus *pumped storage*, air yang ada

pada reservoir diperoleh dari sumber energi lain. Sumber energi ini diperoleh dari sumber yang tidak terpakai, misalnya pada pembangkit listrik di malam hari ketika permintaan energi listrik kecil, atau dari pembangkit listrik tenaga angin dan matahari yang memiliki suplai tidak stabil. Tujuannya adalah merubah energi tersebut menjadi energi potensial air sehingga dapat digunakan ketika dibutuhkan. Artinya, ini merupakan bentuk penyimpanan energi dalam bentuk energi potensial air.



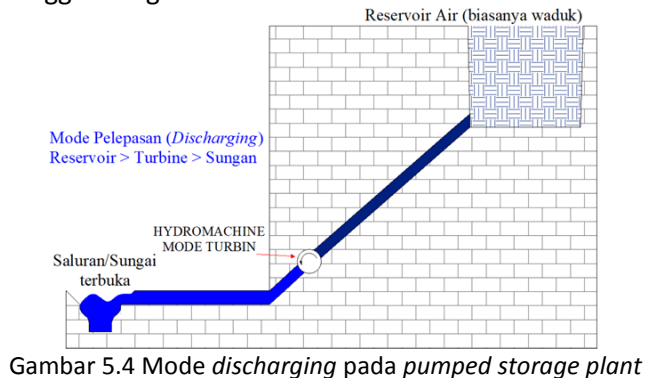
Gambar 5.2 Mode *charging* pada *pumped storage plant*

Sebagaimana sistem penyimpanan energi pada umumnya, mode kerja dari *pumped storage* ada tiga yakni *charging*, *storing* dan *discharging*. Saat proses *charging*, air dari penampungan bawah (biasanya sungai atau ada penampungan tersendiri) dihisap oleh *hydromachine* yang bekerja pada mode pompa dan disalurkan ke reservoir atas (Gambar 5.2.). Agar dapat bekerja, pompa membutuhkan energi, energi ini diperoleh dari energi sisa pada pembangkit listrik atau energi dari pembangkit tenaga angin, matahari maupun kombinasi ketiganya. Total energi yang dibutuhkan oleh pompa dijadikan sebagai nilai energi *input* untuk analisis efisiensi.



Gambar 5.3 Mode *storing* pada *pumped storage plant*

Saat sudah mencapai titik maksimal atau pada kondisi sudah tidak ada energi sisa yang diperoleh untuk menggerakkan pompa, maka *hydromachine* pada kondisi *off* (Gambar 5.3.). Air yang ada pada reservoir dibiarkan untuk digunakan kembali pada saat dibutuhkan. Energi potensial air yang ditampung dilepaskan kembali ketika sistem membutuhkan energi (biasanya pada kondisi malam hari untuk pembangkit energi terbarukan, misalnya angin dan matahari) maupun untuk kondisi beban puncak. Saat mode *discharging*, *hydromachine* berfungsi sebagai turbin yang digerakkan oleh aliran air yang turun ke bawah dari reservoir (Gambar 5.4.). Energi gerak dari turbin digunakan untuk memutar generator sehingga menghasilkan listrik.

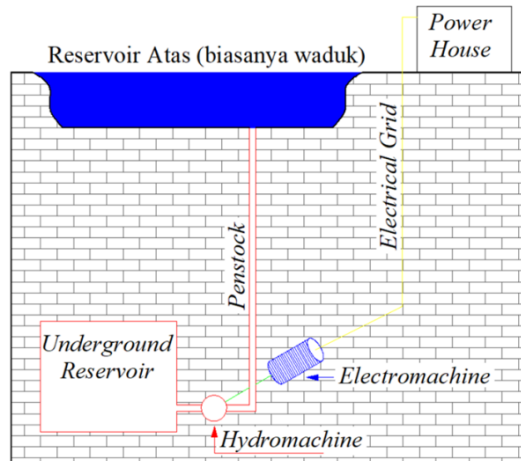


Efisiensi dari sistem *pumped storage* secara umum sebesar 50%. Nilai ini diperoleh berdasarkan acuan bahwa sekitar 30% energi hilang saat memompakan air ke reservoir dan sekitar 20% energi hilang saat air mengalir ke bawah. *Pumped storage* dapat bekerja hingga bertahun-tahun dan hanya mengalami sedikit kerugian akibat siklus berulang. *Pumped storage* juga memiliki *discharge time* yang baik sehingga nilai *power* yang tinggi dapat diperoleh dalam waktu singkat dan mampu beroperasi 100% kurang dari satu menit.

Penyimpanan metode *pumped storage* terbukti layak secara ekonomi, namun terkendala pada aspek geografis karena membutuhkan area yang cukup luas untuk penampungan air. Sebagai upaya alternatif, *pumped storage* dapat dikombinasikan dengan waduk PLTA dengan sumber energi yang dapat diperoleh dari energi angin dan matahari. Konsep ini dikenal

dengan hibridisasi yang pada perhitungan tertentu mampu memaksimalkan potensi energi yang ada. Alternatif lain yang dikembangkan adalah menggunakan *underground* reservoir.

Penyimpanan *underground* reservoir digunakan untuk mensiasati keterbatasan geografis dari model konvensional *pumped storage*. *Underground* reservoir dianggap memiliki potensial yang cukup tinggi meskipun pada saat sekarang statusnya masih dalam tahap pengembangan. Sistem *underground* reservoir bekerja menggunakan prinsip yang sama dengan *pumped storage* pada umumnya. Poin pembeda adalah sistem ini menggunakan satu buah reservoir pada area bawah tanah. Skema *underground* reservoir untuk *pumped storage* disajikan pada Gambar 5.5.

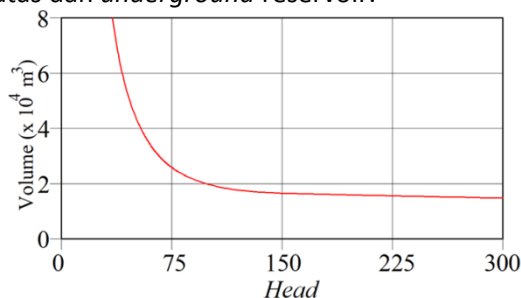


Gambar 5.5 Model *underground* reservoir pada *pumped storage* plant [10]

Reservoir atas dihubungkan dengan *underground* reservoir melalui *penstock*. *Hydromachine* berfungsi pada dua mode, yakni mode pompa dan mode turbin, tergantung pada fungsi *charging* atau *discharging*. Saat *charging*, maka mode yang digunakan adalah mode pompa dan saat *discharging* menggunakan mode turbin. Saat *charging*, pompa digunakan untuk menghisap air dari *underground* reservoir ke reservoir atas. Pompa digerakkan oleh *electromachine* yang berfungsi sebagai motor. Saat *discharging*, air turun dari reservoir atas ke *underground* reservoir dan menggerakkan *hydromachine* yang berfungsi pada mode turbin. Turbin

akan menggerakkan *electromachine* yang berfungsi sebagai generator untuk menghasilkan listrik.

Reservoir atas bisa menggunakan penampungan air alami seperti danau maupun penampungan air buatan seperti waduk. *Underground* reservoir biasanya menggunakan gua bawah tanah yang dikeruk melalui batuan keras sehingga memiliki kekuatan dinding yang baik. *Underground* reservoir bisa saja menggunakan gua buatan namun tentu biaya yang terlalu tinggi menjadi pertimbangan tersendiri. Sebagaimana pada PLTA, daya yang dibangkitkan bergantung kepada perbedaan *head* hidrolis antara reservoir atas dan *underground* reservoir.



Gambar 5.6 Volume yang dibutuhkan pada *head* tertentu untuk menyimpan energi 6 MWh [30]

Hal ini yang memberikan keuntungan tersendiri pada *underground* reservoir karena bisa mencapai nilai *head* hingga 1,400 m (umumnya *head* untuk fasilitas PLTA konvensional alami hanya sekitar 300 m) yang berarti daya keluaran yang sama atau mendekati dengan PLTA yang memiliki penampungan lebih besar bisa diperoleh pada *underground* reservoir dengan kapasitas penampungan yang lebih kecil. Hubungan ini dapat dilihat pada Gambar 5.6. yang menyajikan hubungan antara volume dan *head* untuk menyimpan energi sebesar 6 MWh.

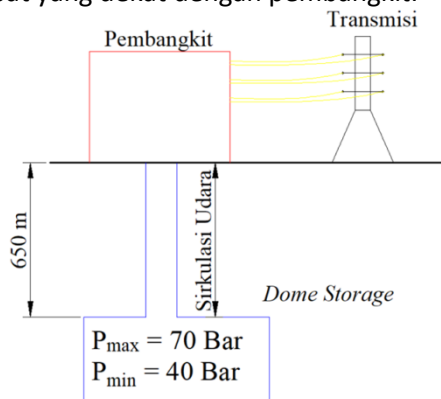
B. UDARA BERTEKANAN (*COMPRESSED-AIR*)

Sistem udara bertekanan secara prinsip sama dengan *pumped storage* karena menggunakan fluida sebagai media kerja, perbedaan mendasar adalah jenis fluida yang digunakan pada *compressed air* adalah udara. Udara ditekan saat beban utilitas rendah dan disimpan pada reservoir bawah tanah. Reservoir yang digunakan umumnya ada dua jenis yakni

reservoir buatan dan reservoir alami. Reservoir alami biasanya adalah gua, kubah garam (*salt domes*), lubang bekas tambang, serta lapangan tambang minyak dan gas. Saat beban puncak, udara yang disimpan dilepaskan untuk menggerakkan turbin.

Teknik yang digunakan pada sistem ini relatif sederhana. Pada sistem turbin gas, gas panas bertekanan tinggi disuplai, sekitar dua pertiga dari daya yang dihasilkan digunakan untuk menggerakkan kompresor. Kompresor pada sistem penyimpanan udara bertekanan memiliki dua mode kerja sehingga memungkinkan untuk digunakan pada mode pengisian (*charging*) dan pelepasan (*discharging*). Sistem udara bertekanan sangat bermanfaat apabila digunakan untuk sistem pembangkit tenaga nuklir dan memiliki gua alami (*salt domes*) sehingga biaya untuk pembuatan reservoir menjadi lebih rendah.

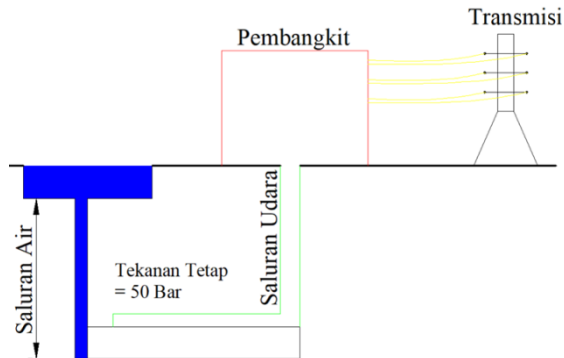
Sejumlah besar energi dapat disimpan menggunakan udara bertekanan yang ditampung pada gua bawah tanah. Studi awal menunjukkan biaya yang digunakan untuk sistem udara bertekanan mendekati biaya untuk *pumped storage*. Namun, model penyimpanan ini sangat terbatas pada ketersediaan dari gua bawah tanah, yang mana tidak hadir di semua tempat yang dekat dengan pembangkit.



Gambar 5.7 Model penyimpanan tipe *sliding pressure* [10]

Terdapat dua jenis model penyimpanan udara bertekanan. Gambar 5.7. menunjukkan model penyimpanan tipe *sliding pressure*. Tipe *sliding pressure* bekerja pada batasan-batasan tekanan kerja tertentu. Saat

pengisian, udara ditekan hingga mencapai batas tekanan maksimal (misalnya 70 bar pada contoh Gambar 5.7.). Ketika *discharging*, udara dilepas hingga mencapai batas tekanan minimal (40 bar pada contoh Gambar 5.7.). Sistem ini relatif jauh lebih sederhana dan cenderung lebih mudah digunakan.



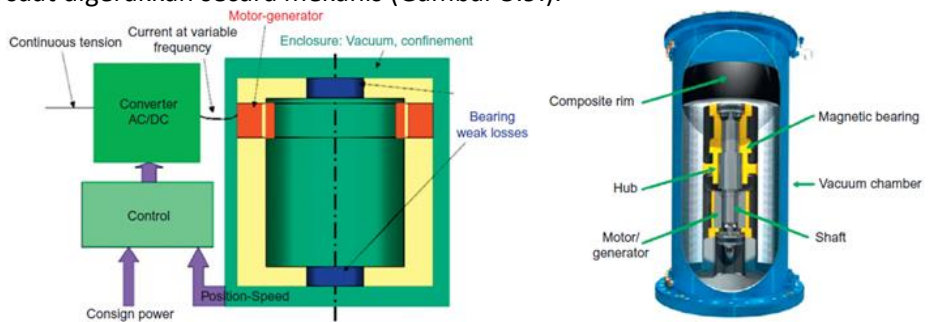
Gambar 5.8 Model penyimpanan tipe *compensated pressure* [10]

Pada tipe *compensated pressure*, tekanan udara dijaga konstan (50 bar pada contoh Gambar 5.8.). Sebagai gantinya, gaya dari luar digunakan untuk menjaga tekanan tersebut sehingga membutuhkan reservoir tambahan untuk menampung fluida kerja tambahan. Proses *charging* dan *discharging* menggunakan fluida kerja tambahan sebagai pengatur. Sistem ini jauh lebih kompleks dibandingkan dengan model *sliding pressure*, namun cocok untuk tempat penampungan model gua bebatuan. Penggunaan fluida tambahan (dalam hal ini air) dapat meminimalisir kerugian akibat kebocoran karena air bersifat tidak dapat dikompresikan (*incompressible*).

Model penyimpanan udara bertekanan yang pertama beroperasi di dunia ada di Hamburg, Jerman yang beroperasi pada tahun 1978. Sistem penyimpanan ini terhubung dengan jaringan listrik lokal. Saat beban pembangkitan rendah, udara ditekan hingga mencapai tekanan 47.78 MPa yang disimpan pada di dua *salt domes*. Kapasitas kedua kubah tersebut adalah 283.179 m³. Saat beban puncak, udara dilepaskan yang kemudian dipanaskan oleh gas alam, kemudian masuk ke sistem turbin tekanan tinggi dan turbin tekanan rendah. Sistem ini dapat memproduksi energi hingga 290 MW selama 2 jam.

C. FLYWHEEL (RODA GILA)

Roda gila atau *flywheel* merupakan sebuah roda yang umumnya relatif memiliki massa yang besar digunakan untuk menyimpan energi kinetik (rotasi). *Flywheel* sudah sejak lama digunakan khususnya pada mesin pembakaran dalam yang berfungsi untuk menjaga stabilitas daya keluaran dari poros akibat perubahan siklus kerja mesin. Pada aplikasi penyimpanan energi, sistem *flywheel* menggunakan prinsip kerja yang sama dan tentunya dibuat pada mode kerja yang sesuai dengan sistem penyimpanan energi. Sistem ini dapat bekerja sebagai penggerak (motor) saat diberi beban listrik dan dapat bekerja untuk membangkitkan listrik (generator) saat digerakkan secara mekanis (Gambar 5.9.).



Gambar 5.9 Contoh sistem *flywheel* atau akumulator [30]

Pada area terpencil atau terisolasi yang sangat sulit untuk dijangkau menggunakan jaringan listrik utama, pembangkit listrik kecil biasanya digunakan untuk memenuhi kebutuhan pada area tersebut. Tantangannya adalah variasi beban listrik yang sangat tinggi akibat dari pengguna yang sedikit (dalam kategori jumlah pengguna), sehingga dibutuhkan upaya tinggi untuk menjaga stabilitas suplai listrik, oleh karenanya pembangkit yang digunakan biasanya hanya dioperasikan setengah dari jumlah yang tertulis. Misalnya, pembangkit diesel beroperasi pada setengah kapasitas pembangkitan dan ketika beberapa pengguna menggunakan beban listrik secara bersamaan, maka pembangkit diesel ini mampu untuk menaikkan daya sesuai dengan kapasitas pembangkitan penuh.

Sistem kerja pembangkit diesel yang menggunakan bahan bakar secara langsung memiliki beberapa kekurangan. Pertama, ketika generator hanya beroperasi pada sebagian kecil kapasitasnya, maka generator ini

tidak bekerja secara efisien. Jumlah bahan bakar yang dikonsumsi meningkat, dan sebagai gantinya, biaya per-kWh akan naik. Kedua, sistem modular generator, khususnya pada *fuel cell* dan turbin mikro, variasi beban menyebabkan adanya *thermal stress* pada generator yang membuat usia pakai generator menjadi lebih pendek. Kedua masalah tersebut dapat diatasi dengan menggunakan *flywheel* sebagai media penyimpanan energi kinetik sehingga generator dapat bekerja pada puncak efisiensinya.

Sistem *flywheel* bekerja berdasarkan prinsip energi kinetik untuk proses penyimpanan dan pelepasan energi berdasarkan permintaan beban. Selama masa penyimpanan, *flywheel* beroperasi pada kecepatan putar tinggi sebagai fungsi dari motor. Selama siklus pelepasan energi (*discharging*), energi kinetik yang disimpan oleh *flywheel* dimanfaatkan untuk membangkitkan listrik karena motor yang terhubung berubah fungsi menjadi generator. Dengan menggunakan sistem kendali dan unit konversi daya yang sesuai, energi yang dibutuhkan dapat dipenuhi dengan mudah. Energi kinetik yang disimpan pada *flywheel* proporsional terhadap massa dan pangkat dua kecepatan putarnya, maka energi maksimum yang dapat disimpan oleh *flywheel* bergantung kepada kekuatan Tarik (*tensile strength*) dari material *flywheel*.

BAB
6

PENYIMPANAN ENERGI KIMIAWI

A. BATERAI *ELECTROCHEMICAL* (KIMIA–ELEKTRIK)

Penyimpanan basis kimia pada prinsipnya memanfaatkan reaksi kimia untuk penyimpanan dan pelepasan energi. Energi yang disimpan merupakan energi potensial kimia. Energi yang dihasilkan dari reaksi kimia dapat berupa energi listrik (*electron flow*) maupun energi panas. Energi listrik–kimia sering disebut dengan *electrochemical* dan energi panas–kimia disebut dengan *thermochemical*.

Salah satu jenis *electrochemical* yang sering digunakan adalah baterai. Baterai asam timbal (*lead–acid*) sudah sejak lama digunakan, memiliki banyak keuntungan dan digunakan pada banyak aplikasi [31]. Terdapat tiga aplikasi umum dari baterai berdasarkan perspektif penyimpanan energi dalam jumlah besar untuk penggunaannya yakni:

- Manajemen beban utilitas listrik (pada pembangkit)
- Kendaraan listrik
- Penyimpanan pembangkit energi baru terbarukan (*photovoltaic* dan turbin angin).

Untuk manajemen beban utilitas listrik pada pembangkit (a), penggunaan baterai lebih dipilih dibandingkan dengan *pumped storage* maupun *compressed air* jika kapasitas penyimpanannya tidak terlalu besar. Terlebih, konstruksi dari baterai cenderung lebih sederhana dibandingkan kedua metode tersebut, membuatnya lebih mudah untuk disesuaikan

dengan permintaan dari sistem utilitas. Efisiensi dari baterai lebih tinggi dibandingkan dengan penyimpanan mekanis. Rerata efisiensi baterai adalah 70–80% sedangkan sistem mekanis berkisar antara 50–70%.

Energi listrik yang dihasilkan oleh sistem energi terbarukan sangat sulit untuk digunakan secara langsung. Oleh karenanya, listrik yang dibangkitkan disimpan sementara dan akan dikeluarkan begitu sudah diperlukan kembali secara stabil. Baterai yang digunakan pada aplikasi sistem energi terbarukan secara prinsip sama dengan baterai yang digunakan pada kendaraan, yakni *electrochemical battery*. Perbedaan utama terletak pada desain berdasarkan tujuan penggunaan. Baterai untuk mobil digunakan untuk sistem gerak mula yang membutuhkan arus besar dalam waktu singkat. Baterai ini didesain untuk selalu terisi penuh (sistem pengisian aktif mengisi baterai ketika mesin sudah bekerja) dan memiliki usia pakai yang singkat jika digunakan untuk siklus pengosongan besar (*deep discharge*) yang mana siklus tersebut dilakukan pada sistem energi terbarukan. Siklus *deep discharge* menguras sebagian besar energi yang tersimpan pada baterai sebelum diisi ulang [32].

Baterai pada sumber energi terbarukan umumnya terdiri dari banyak rangkaian sel 2 volt. Baterai 6 dan 12 volt juga kadang digunakan pada sistem energi terbarukan. Jenis baterai yang paling umum digunakan adalah baterai basah (*flooded-cell*) tipe asam timbal. Beberapa aplikasi juga sudah mulai menggunakan tipe baterai kering (*sealed-type*). Jenis baterai lain yang digunakan adalah *Nickel-Cadmium* (NiCad) dengan kelebihan utama memiliki siklus yang lebih panjang dan stabilitas tegangan yang dikeluarkan yang baik, namun harganya relatif lebih mahal dibandingkan jenis asam timbal [10].

Kapasitas pada baterai ditentukan berdasarkan nilai Ah (*Ampere-hour*). Nilai kapasitas Ah baterai bervariasi, mulai dari 1 sampai di atas 2,000 Ah. Nilai Ah memberikan informasi berapa banyak arus yang dapat disuplai dalam satuan waktu. Misalnya, baterai 100 Ah, maka dapat menyuplai arus sebesar 1 *Ampere* selama 100 jam, atau bisa juga 2 *Ampere* selama 50 jam, atau bisa juga 10 *Ampere* untuk 10 jam, dan seterusnya.

Pemakaian memberikan pengaruh yang besar terhadap usia pakai baterai. Untuk memaksimalkan usia baterai, hendaknya energi yang disimpan pada baterai hanya digunakan sedikit saja dari total kapasitas yang ada sebelum dilakukan pengisian ulang. Hal ini dikarenakan tiap kali baterai melepaskan energi kemudian diisi kembali, baterai tersebut mengalami siklus pengisian/pelepasan energi, meskipun secara teoritis ideal nilai satu siklus dianggap apabila baterai diisi dari 0 sampai *fully charged*.

Saat pemakaian, apabila energi yang tersimpan pada baterai dilepaskan lebih dari setengahnya sebelum diisi kembali, maka baterai tersebut mengalami *deep cycling*. Sebaliknya, apabila energi yang tersimpan pada baterai hanya dilepaskan sedikit saja (kisaran 1–20%) sebelum diisi kembali, maka baterai tersebut mengalami *shallow cycling*. Baterai asam–timbal tipe *deep cycle* yang didesain untuk aplikasi penyimpanan energi listrik dari panel surya memiliki usia siklus berkisar antara 300 sampai 5,000 siklus (jika menggunakan baterai NiCad bisa mencapai hingga 50,000 siklus), pelepasan energi dibatasi hanya berkisar 20% dari total energi untuk tiap siklus. Pada penyimpanan baterai di sistem panel surya, baterai mengalami satu *shallow cycle* tiap harinya, namun pada kondisi mendung atau intensitas matahari rendah, baterai tersebut mengalami *deep cycle*. Agar usia baterai bisa maksimal, *shallow cycle* harus dibatasi kurang dari 20% total kapasitas dan *deep cycle* dibatasi kurang dari 80% [33]. Baterai dapat mengalami kerusakan akibat *overcharge*. Tiap baterai secara keseluruhan maupun tiap sel memiliki batasan-batasan tegangan tertentu. Umumnya, untuk tiap sel 2 V, batasan tegangan pengisian adalah 2.5 V dan untuk baterai 12 V batasannya adalah 15 V. Panel surya memiliki tegangan kerja 18 V atau lebih, meskipun ada beberapa panel surya yang dapat mengatur tegangan keluaran hingga 15 V, pengaturan pengisian (regulator) mutlak diperlukan. Tantangan lainnya adalah apabila baterai digunakan untuk fungsi utilitas pembangkit, maka hanya sedikit energi yang bisa disimpan akibat tegangan tinggi *Alternating Current* (AC) yang dibangkitkan. Tantangan lain dari penyimpanan baterai *electrochemical* adalah:

- a. Total energi yang dapat disimpan per satuan massa relatif kecil
- b. Total densitas daya per satuan massa juga kecil

- c. Baterai yang dapat diisi ulang hanya mampu bertahan pada beberapa siklus yang terbatas.

Biaya dari sistem baterai tidak kompetitif untuk aplikasi skala besar sistem penyimpanan energi. Sebagai gambaran, penyimpanan listrik melalui baterai bisa lebih mahal hingga 50% dibandingkan dengan *pumped storage* [34].

B. KARAKTERISTIK BATERAI *ELECTROCHEMICAL*

Beberapa reaksi kimia dapat terjadi dan mampu dibalikan (*reversible*) dengan pemberian tegangan. Konsep tersebut merupakan dasar dari baterai *electrochemical*. Pengembangan baterai terjadi secara signifikan sejak abad 19 dan mengalami banyak peningkatan namun masih dibawah hasil yang diharapkan dari karakteristik ideal baterai pada era sekarang. Beberapa baterai yang paling mendekati dengan harapan pemakaian jangka panjang dan kapasitas sistem penyimpanan energi berasal dari baterai sodium atau *lithium*. Baterai tersebut mendapat perhatian yang tinggi dan sedang dalam tahap pengembangan intensif. Untuk dapat beroperasi dengan maksimal, suhu kerja baterai harus dijaga pada temperatur tinggi (beberapa ratus derajat *Celcius*). Meskipun membutuhkan suhu tinggi, baterai tersebut mampu menunjukkan kapasitas penyimpanan energi yang tinggi per satuan massa.

Baterai sodium secara prinsip dapat menyimpan energi hingga 200 Wh/kg. Dibandingkan dengan baterai *Nickel–Cadmium*, nilai tersebut jauh lebih tinggi karena baterai *Nickel–Cadmium* hanya mampu menyimpan energi pada kisaran 24 Wh/kg. Selain kapasitas yang tinggi, agar dapat digunakan pada aplikasi utilitas penyimpanan energi, baterai tersebut harus mampu tahan terhadap siklus yang berulang-ulang pada siklus teoritis ideal. Baterai tersebut diharapkan mampu memiliki siklus teoritis ideal lebih dari 1,000 siklus, dan target yang paling mutakhir adalah mampu bertahan hingga 10,000 siklus [35].

Terdapat beberapa istilah yang digunakan pada baterai sesuai dengan aplikasi praktis. Beberapa istilah ini mirip dengan parameter operasi penyimpanan energi (Bagian 4.1.), namun lebih spesifik karena ditunjukkan untuk baterai listrik. Karakteristik ini sangat penting untuk

menentukan baterai mana yang sesuai untuk aplikasi tertentu. Lima ukuran yang digunakan untuk baterai kendaraan listrik antara lain:

- a. Energi spesifik (Wh/kg), berfungsi untuk menentukan besarnya energi yang disimpan baterai, karena berkaitan dengan beban kendaraan, semakin tinggi energi spesifik baterai tersebut, maka semakin kecil beban dari baterai.
- b. Densitas energi berdasarkan volume atau volumetrik (Wh/L atau Wh/m³) maupun berdasarkan massa atau gravimetrik (Wh/kg), berkaitan dengan banyaknya energi per satuan volume atau massa, yang mana ini penting untuk menentukan ukuran baterai yang akan digunakan pada ruangan kendaraan. Densitas energi yang tinggi memungkinkan penyimpanan energi yang lebih besar untuk satuan volume atau massa yang lebih kecil.
- c. Daya spesifik (W/kg), yang merupakan nilai penting pada kendaraan listrik karena berkaitan dengan kebutuhan daya yang besar untuk akselerasi. Nilai ini ditentukan saat baterai pada kondisi *fully charged* dan semakin menurun seiring dengan berkurangnya energi yang tersimpan pada baterai tersebut.
- d. Siklus (*cycle*) (Lihat bagian 4.4.)
- e. Biaya (Rp./kWh) (Lihat bagian 4.6.)

Sebagai sistem penyimpanan yang sudah berkembang sejak lama, terdapat banyak jenis baterai yang beredar di pasaran umum dengan ragam kemampuan dan kapasitas. Perkembangan baterai masih berlanjut karena sistem penyimpanan melalui baterai untuk skala besar kurang sesuai karena beban (massa) yang terlalu berat, biaya dan juga performanya. Baterai yang paling umum dijumpai adalah baterai asam timbal, namun terdapat beberapa jenis baterai lainnya yang menarik untuk dikaji.

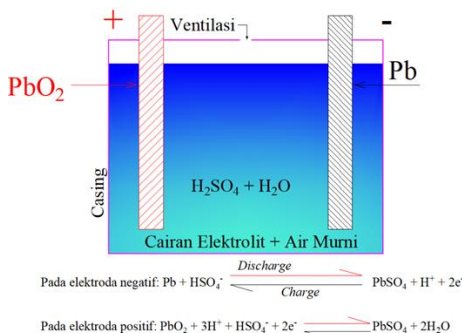
C. BATERAI ASAM TIMBAL

Baterai asam timbal (*lead-acid*) selama bertahun-tahun mendominasi pasar pengguna baterai. Baterai ini menggunakan timbal dioksida (PbO₂) pada satu kutub (*elektroda*) yang direndam dengan cairan asam sulfat (cairan elektrolit) pada tiap sel baterai. Akibat dari reaksi antara asam

sulfur dengan timbal dioksida, elektron terlepas dan mengalir melalui rangkaian ke kutub baterai lainnya yang terbuat dari timbal (Pb) [36]. Reaksi ini menghasilkan daya listrik. Selama bereaksi, timbal dioksida bereaksi membentuk sulfat dan kadar cairan asam sulfat menurun akibat adanya air. Baterai ini dapat diisi ulang (*recharge*) dengan memaksa elektron untuk mengalir pada arah sebaliknya melalui pemberian tegangan yang melebihi tegangan baterai. Hal ini yang menjadi alasan mengapa tegangan pengisian harus lebih tinggi (pada batasan tertentu) dari tegangan awal baterai.

Nilai energi spesifik pada baterai asam timbal yang beredar secara umum di pasaran hanya sekitar 126 kJ/kg (dengan asumsi efisiensi konversi sebesar 100%). Sebagai perbandingan, energi spesifik dari bensin secara umum adalah 35,000 kJ/kg. Jika efisiensi mesin pembakaran hanya 20%, maka energi dari bensin yang dapat dimanfaatkan adalah 7,000 kJ, tetap jauh lebih tinggi dibandingkan dengan energi spesifik dari baterai asam timbal. Perhitungan model ini dibutuhkan untuk memberikan perbandingan energi terkait dengan kendaraan listrik maupun kendaraan *hibrid*.

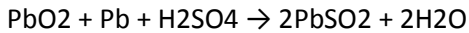
Prinsip kerja dan reaksi yang terjadi pada baterai asam timbal disajikan pada Gambar 6.1. Terdapat dua model reaksi yakni saat *charging* dan *discharging*.



Gambar 6.1 Reaksi pada baterai asam timbal [36]

Tiap sel baterai memiliki dua elektroda yang direndam pada cairan elektrolit. Reaksi kimia sebagaimana terlihat pada Gambar 6.1. terjadi antara elektroda dan cairan elektrolit, melepaskan elektron pada kutub

negatif dan mengalirkannya ke kutub positif sehingga memiliki potensi untuk melakukan kerja elektrik. Ketika energi dilepaskan, maka otomatis terjadi perubahan komposisi kimia pada sistem secara menyeluruh, reaksi tersebut adalah:



Hasil reaksi atau produk ada pada sisi kanan. Timbal sulfat (PbSO_2) sebagai produk reaksi terdeposit di elektroda, sementara air murni bercampur dengan cairan elektrolit. Semakin banyak reaksi yang terjadi, semakin tinggi produk yang dihasilkan sehingga pada satu titik, reaksi mencapai titik kesetimbangan (*equilibrium*) dan tidak ada potensial listrik lagi. Sebagai sistem mampu balik (*reversible*), elektron pada kutub positif didorong kembali ke kutub negatif dengan memberikan tegangan searah (*Direct Current*, DC).

Meskipun dinyatakan sebagai baterai dengan tingkat kematangan teknologi terbaik sejauh ini, baterai asam timbal memiliki umur yang cukup pendek untuk teknologi yang berkembang pada masa sekarang. Kekurangan lainnya adalah massa baterai yang terlalu berat yang menjadi kendala tersendiri bagi kendaraan listrik. Inovasi dan perkembangan terus dilanjutkan untuk memperbaiki kelemahan tersebut, khususnya terkait dengan konstruksi dan operasi baterai. Sebagai contoh, upaya untuk menghindari deposit dan korosi pada elektroda yang biasa digunakan dalam bentuk padat, penggunaan elektroda cair dapat dijadikan alternatif.

Di pasaran umum, tipe *deep-cycle* baterai timbal tersedia dalam tiga tegangan kerja, yakni tegangan 6, 8 dan 12 V. Masing-masing tegangan kerja memiliki karakteristik tersendiri. Tegangan 6 V direkomendasikan untuk pemakaian jangka panjang karena spesifik energi yang lebih baik. Untuk performa, penggunaan tegangan 12 V direkomendasikan, tegangan ini juga digunakan untuk aplikasi pada sistem kendaraan baru dengan tegangan 144 V. Baterai 8 V memberikan peluang hibridisasi tegangan 6 V dan 12 V.

Cairan elektrolit dipengaruhi oleh temperatur, sehingga performa baterai asam timbal secara langsung berhubungan dengan temperatur. Hal ini disebabkan konsentrasi cairan elektrolit berubah-ubah, bergantung terhadap suhu. Baterai yang digunakan pada suhu 0 °C hanya mampu beroperasi sebesar 70% dari total kapasitasnya. Kondisi ini yang melandasi

kenapa ada spesifikasi *Cold Cranking Ampere* (CCA) pada baterai asam timbal. Pada suhu operasi 43.3 °C, baterai mampu bekerja hingga 110% dari kapasitasnya. Rekomendasi suhu kerja baterai adalah 25.5 °C. Karena adanya pengaruh dari suhu, maka sebaiknya baterai dilengkapi dengan isolator termal (untuk wilayah dingin) dan dilengkapi dengan sistem *thermal management* untuk wilayah dengan suhu tinggi.

D. BATERAI-BATERAI KELAS PADUAN NIKEL (ZINC, IRON, CADMIUM)

Sebagai upaya mengatasi kekurangan pada baterai asam timbal, teknologi baterai kelas paduan nikel dikembangkan, antara lain baterai paduan nikel–seng (Ni–Zn), nikel–besi (Ni–Fe) dan Nikel–Kadmium (Ni–Cd). Baterai dengan elektroda metalik (Ni–Zn dan Ni–Fe) sudah masuk pada tahap pengembangan lanjut. Baterai Ni–Zn menggunakan kalium hidroksida yang diencerkan sebagai elektrolit. Kekurangan utama dari baterai Ni–Zn adalah usia pakainya yang hanya bertahan antara 200-300 siklus. Penelitian difokuskan untuk meningkatkan siklus hingga berkisar pada rentang 300-500. Meskipun usia siklusnya tergolong pendek, aplikasi baterai tersebut cocok untuk pengendaraan wilayah perkotaan jarak dekat dimana pengisian penuh biasanya jarang dibutuhkan. Densitas energi baterai ini sekitar 65 Wh/kg, target pengembangan adalah 80 Wh/kg. Densitas daya baterai Ni–Zn cukup tinggi dengan nilai 175 W/kg [37].

Baterai Ni–Fe secara prinsip sama dengan Ni–Zn. Densitas energi yang dimilikinya berkisar 50–55 Wh/kg dengan densitas daya 100 W/kg. Usia pakai baterai Ni–Fe sangat baik hingga 900 siklus, namun kendala utama baterai ini adalah ukuran yang relatif besar. Hal lain yang menyulitkan dari baterai ini adalah terbentuknya gas hidrogen pada jumlah besar dari elektroda, yang mana menurunkan efisiensi baterai serta berbahaya karena hidrogen adalah gas yang mudah terbakar. Pada aspek operasional, baterai ini memiliki kelemahan pada operasi di suhu rendah karena dayanya menurun dengan drastis pada suhu di bawah 10 °C serta tidak bisa dioperasikan pada suhu 0 °C atau lebih rendah. Alternatifnya, dibutuhkan sistem pemanas untuk operasional pada wilayah dengan suhu rendah.

Baterai Nikel–Kadmium (Ni–Cd) telah digunakan pada beberapa negara, seperti wilayah Eropa dan Jepang. Secara harga, jenis baterai Ni–Cd lebih mahal dibandingkan baterai asam timbal karena pengaruh dari nikel yang cukup mahal. Keuntungan utama dari baterai Ni–Cd adalah memiliki densitas energi yang tinggi dan mempunyai usia pakai yang panjang hingga 1,000 siklus. Baterai Ni–Cd mampu diisi dengan cepat, namun cenderung *overheat*. Aspek kekurangan lainnya adalah kadmium termasuk kategori bahan beracun sehingga upaya daur ulang perlu dilakukan secara cermat.

E. BATERAI *LITHIUM*

Baterai *lithium–iron* (Li–Fe) memiliki elektroda negatif yang terbuat dari paduan *aluminum* (Al) dan *lithium* (Li), sedangkan pada elektroda positif menggunakan besi sulfida. Cairan elektrolit baterai ini menggunakan *molten salt* (garam cair). *Molten salt* tersebut memiliki titik leleh sebesar 350 °C, oleh karenanya suhu baterai harus dijaga di atas titik leleh tersebut. Baterai tipe ini memiliki potensial yang cukup tinggi untuk digunakan pada kendaraan listrik. Bentuk baterai ini kompak, dengan target proyeksi rasio energi/volume lebih dari 200 Wh/L, yang secara langsung memiliki rasio energi spesifik yang tinggi dengan nilai 100 Wh/kg serta densitas daya minimal berkisar pada angka 100 W/kg [38].

Litium sangat reaktif terhadap air. Sebagai kelompok logam alkali, litium bereaksi dengan air dan menghasilkan gas hidrogen. Gas tersebut berbahaya pada aplikasi kendaraan. Untuk mensiasati hal tersebut dan sebagai bentuk konfirmasi, uji coba prototipe dilakukan pada sel baterai tersebut dengan cara dihancurkan menjadi pecahan kecil dan terbukti tidak menghasilkan pembakaran. Selain masalah tersebut, terdapat beberapa kendala teknis yang harus dipecahkan untuk memaksimalkan usia pakai baterai jenis ini. Sementara, usia pakai baterai hanya bertahan sampai 200 siklus. Target komersialisasi baterai ini adalah 1,000 siklus.

Alternatif penggunaan litium sebagai baterai adalah baterai litium–ion. Baterai litium–ion diprediksi sebagai baterai yang akan digunakan untuk jangka panjang meskipun untuk saat sekarang masih terkendala pada kapasitas dan usia pakai yang belum maksimal. Hal yang paling menjanjikan dari baterai ini adalah rendahnya efek memori baterai

(*memory effect*), spesifik energi yang mumpuni yakni 100 Wh/kg, memiliki daya spesifik yang tinggi dengan nilai 300 W/kg, dan usia pakai hingga 1,000 siklus. Sebagai catatan, *memory effect* terjadi ketika baterai diisi ulang kembali sebelum seluruh isinya habis. Tindakan tersebut yang dilakukan berulang-ulang membuat baterai untuk “mengingat” siklus pemakaian terendah sebelum diisi ulang.

Baterai litium-ion memiliki tegangan 28.8 V yang terdiri dari delapan sel berbentuk silinder dengan wadah terbuat dari resin. Tiap baterai memiliki fitur pengatur sel untuk memastikan tiap sel beroperasi pada cakupan tegangan kerja yang spesifik pada rentang 2.5–4.2 V selama proses *charging* dan *discharging*. Pengatur sel berkomunikasi dengan pengatur baterai kendaraan untuk memaksimalkan penggunaan daya dan energi. Tantangan utama dari baterai litium-ion adalah harganya yang mahal serta membutuhkan sistem ventilasi untuk mendinginkan baterai. Biaya yang mahal tersebut disebabkan oleh penggunaan kobalt (Co) sebagai anoda, penggunaan elektrolit dari organik material yang dimurnikan, serta sistem pengatur yang rumit.

Baterai litium sulfida merupakan baterai dengan temperatur tinggi yang bekerja berdasarkan prinsip sistem elektrokimia paduan litium atau *molten salt* maupun sulfida logam. Sistem ini memberikan spesifik daya yang baik untuk akselerasi yang handal. Keuntungan lainnya adalah ukuran yang relatif kecil, ringan dan biaya yang murah per-kWh. Baterai ini terdiri dari *iron disulfide* dan paduan litium *aluminum*, yang mana sepenuhnya dapat didaur ulang.

Baterai litium-polimer bekerja berdasarkan teknologi lapisan tipis. Baterai ini diprediksi memiliki biaya 20% lebih mahal dibandingkan dengan baterai asam timbal, namun memiliki energi dua kali lipat lebih besar dengan usia pakai hingga 50,000 mil. Suhu kerja baterai ini berada pada kisaran 65–120 °C. Baterai ini memiliki kemampuan pengisian cepat kurang dari 90 menit, namun sangat rentan jika terjadi *overcharging*. Tantangan paling tinggi dari baterai ini adalah perbaikan pada ukuran baterai agar dapat digunakan pada kendaraan listrik.

F. BATERAI LAINNYA

Beberapa baterai jenis lain dikembangkan pada tingkatan yang lebih maju lagi. Contohnya adalah baterai sodium–sulfur (Na–S) dengan elektrolit dari bahan kaca. Ada juga ketertarikan khusus pada baterai *aluminum*–udara yang diprediksi dapat mencapai tingkatan energi yang tinggi. Terlebih elemen *aluminum* tidak terlalu mahal, sehingga memungkinkan untuk dilakukan penggantian secara mekanis dari *aluminum* yang digunakan dibandingkan dengan melakukan pengisian ulang [39].

Baterai yang sangat mumpuni saat ini dan banyak menarik minat penelitian adalah teknologi baterai *nickel*–metal *hydride* (NiMH). Baterai ini dibuat dari bahan yang tidak beracun, dapat didaur ulang dan ramah lingkungan. Baterai NiMH memiliki cakupan penggunaan dan usia siklus dua kali lipat lebih baik dibandingkan baterai asam timbal pada masa sekarang. Baterai ini dibuat dari nikel hidroksida dan hasil rekayasa multi komponen kombinasi yang terdiri dari paduan vanadium (V), titanium (Ti), nikel (Ni) dan beberapa logam lain. Baterai ini menggunakan termasuk kategori *sealed* baterai, bebas perawatan (*maintenance free*), dan memiliki kemampuan pengisian cepat. Selain itu, baterai ini mampu bertahan pada kondisi *overcharging* dan *over discharge* [40].

Baterai jenis lainnya berasal dari kategori Natrium–nikel klorida (NaNiCl₂). Baterai ini beroperasi pada suhu 300 °C. Baterai ini diklaim aman jika terjadi kecelakaan, dan tetap dapat berfungsi jika salah satu sel baterai rusak. Pemanasan dan pendinginan baterai dapat dilakukan tanpa merusak baterai tersebut, namun, jika suhu turun sampai di bawah 270 °C, maka tidak akan ada arus yang mengalir. Permasalahan yang menjadi isu utama adalah biaya yang digunakan untuk produksi baterai ini masih tergolong tinggi.

G. PERKEMBANGAN PADA BATERAI

Perkembangan baterai pada prinsipnya sudah mencapai tahap yang begitu maju. Berbicara tentang perkembangan baterai secara prinsip sama dengan berbicara tentang perkembangan listrik karena keduanya nyaris mulai dikembangkan pada saat yang sama. Sebagai gambaran, perkembangan dari baterai asam timbal dalam waktu dekat akan

mencapai target 60 Wh/kg dengan usia pakai 1,000 siklus. Target tinggi tersebut sudah mendekati limit dari baterai asam timbal, namun masalahnya adalah target tersebut masih kurang ideal untuk digunakan pada kendaraan listrik karena masih terhitung cukup berat. Oleh sebab itu, fokus penelitian ditunjukkan pada penemuan material baru yang memiliki bobot lebih rendah [41].

Selama beberapa dekade, penelitian dan pengembangan dilakukan pada baterai dengan desain yang berbeda dari desain umumnya. Kandidat yang mendekati desain ideal antara lain *lithium*–logam sulfida, seng–klorida, natrium–sulfur. Keuntungan dari tiga jenis baterai tersebut adalah:

- a. Menggunakan elemen yang ringan untuk salah satu atau bahkan kedua elektroda baterai sehingga densitas yang lebih tinggi dapat dicapai.
- b. Beroperasi pada suhu yang relatif tinggi.

Baterai seng–klorida harus berada pada suhu minimal 40 °C agar elektrolitnya dapat bekerja dengan maksimal. Baterai *lithium*–logam sulfida dan seng–klorida bekerja pada rentang suhu 300-400 °C. Pengembangan dari seng klorida sedikit melambat dikarenakan bahaya dari gas klorin.

Pengembangan baterai sangat penting untuk dimungkinkannya sistem pembangkitan mandiri pada panel surya dan turbin angin. Pengembangan tersebut juga bermanfaat bagi aplikasi utilitas pembangkit listrik sebagai bentuk alternatif dari penggunaan *pumped storage* dan yang paling utama adalah untuk aplikasi kendaraan listrik. Untuk memenuhi kriteria pada seluruh aplikasi tersebut, masih sangat dibutuhkan banyak peningkatan teknis pada desain dan komponen baterai dan tentu saja, biaya yang harus dibuat semurah mungkin. Konsep baterai maju biasanya mengacu kepada variasi dari model konvensional baterai asam timbal.

Dari semua bentuk pengembangan yang ada, aspek terpenting adalah meningkatkan usia pakai baterai sehingga secara biaya dapat menjadi lebih kompetitif. Pengembangan baterai maju dilakukan untuk mencapai target global dengan siklus baterai melebihi 2,000 siklus dan usia pakai melebihi 10 tahun. Berdasarkan siklus harian, maka dapat mencapai hingga 3,650 siklus untuk target usia pakai 10 tahun. Nilai tersebut dapat

dengan jelas digambarkan melalui perbandingan antara sistem penyimpanan baterai dan *pumped storage*. Usia pakai model umum *pumped storage* dapat mencapai hingga 50 tahun dengan tidak adanya batasan siklus terkait dengan proses *charging* dan *discharging*.

Upaya untuk mencapai teknologi baterai maju hingga tahap komersil dilakukan melalui pembentukan konsorsium. Contoh dari konsorsium tersebut dilakukan oleh *United States Advanced Battery Consortium* (USABC) yang terdiri dari *Ford, Chrysler, General Motors* (GM), Departemen Energi Amerika, Laboratorium Nasional dan perusahaan baterai. USABC membuat *time line* yang diatur secara spesifik termasuk target dari pengembangan baterai yang dibuat. Target tersebut disajikan pada tabel 6.1.

Tabel 6.1 Target jangka menengah dan panjang dari USABC[10]

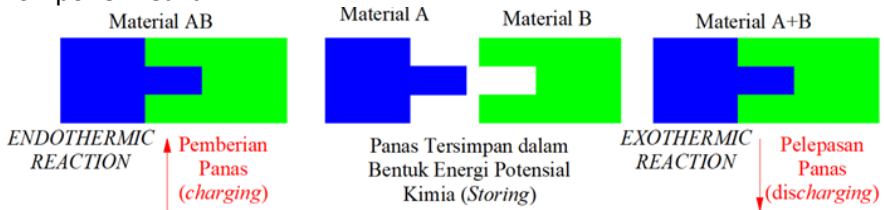
Karakteristik	Target Menengah	Target Jangka Panjang
Energi spesifik (Wh/kg)	80 – 100	200
Daya spesifik (W/kg)	150 – 200	400
Waktu pengisian (jam)	< 6	3 – 6
Usia siklus (siklus)	600	1,000
Harga (\$/kWh)	< 150	< 100

Target pada Tabel 6.1. dimulai pada tahun 2000. Khusus untuk aplikasi kendaraan listrik, isu paling utama adalah berat total dan volume dari baterai. Berat dan volume dari baterai harus bisa mendekati dari berat dan ukuran energi dari bahan bakar yang digunakan pada kendaraan umumnya.

H. THERMOCHEMICAL (KIMIA–TERMAL)

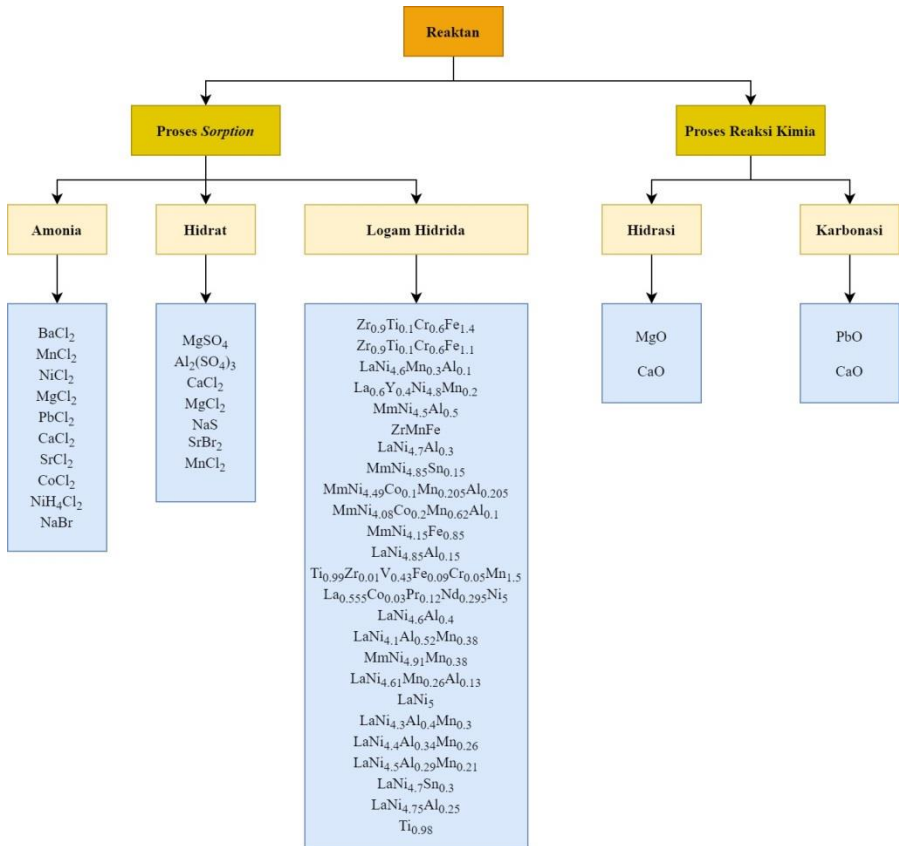
Penyimpanan kimia-termal atau *thermochemical* merupakan jenis penyimpanan energi yang memanfaatkan energi potensial kimia. Penyimpanan dan pelepasan kalor dapat dilakukan melalui prinsip reaksi kimia. Reaksi kimia mampu balik (*reversible*) terjadi antara reaktan atau komponen reaktif mampu menyimpan dan melepas panas reaksi. Dengan memberikan panas pada pasangan material penyimpanan (reaksi *endothermic*), ikatan antar molekul kedua material tersebut dapat

terpecah, dan hasilnya adalah kedua material tersebut terpisah sebagai komponen reaktif.



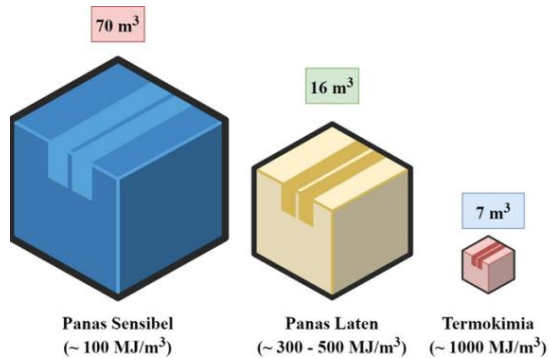
Gambar 6.2 Ilustrasi proses *thermochemical* [42]

Gambar 6.2. menyajikan ilustrasi proses *thermochemical* yang melibatkan material A dan B. Pada proses awal, Material AB memiliki ikatan molekul, saat diberikan panas (*charging*), ikatan molekul material AB terpecah. Akibat terjadi pemecahan ikatan molekul, maka muncul dua material yang terpisah yakni Material A dan Material B. Saat terpisah, maka energi panas proses *charging* disimpan dalam bentuk energi potensial kimia yang selama Material A dan B tidak bereaksi, panas potensial tersebut akan tetap tersimpan. Saat *discharging*, Material A dan Material B bereaksi dan melepaskan panas reaksi (*exothermic*). Siklus ini dapat dilakukan berulang-ulang.



Gambar 6.3 Bagan material yang dikembangkan sebagai *thermochemical* [43]

Reaktan atau reaktif komponen yang sedang dikembangkan terkait dengan penyimpanan *thermochemical* berdasarkan proses penyerapan (*sorption*) dan reaksi kimia ditunjukkan pada Gambar 6.3. Terlihat bahwa basis proses *sorption* memiliki opsi yang lebih banyak dengan penggunaan logam hidrida sebagai kandidat yang paling banyak. Motivasi utama dari pengembangan dan penelitian berkelanjutan dari *thermochemical* didasari pada tingginya densitas energi sistem penyimpanan ini. Gambar 6.4. memperlihatkan rasio perbandingan penyimpanan kalor basis sensibel, kalor laten dan *thermochemical*.



Gambar 6.4 Perbandingan densitas energi penyimpanan termal [43]

Penyimpanan kalor melalui prinsip *thermochemical* menawarkan banyak keuntungan. Keuntungan tersebut khususnya untuk durasi penyimpanan jangka panjang, minimnya kerugian panas dan usia siklus dari material kerja yang panjang. Terlepas dari seluruh keuntungan tersebut, pemanfaatan *thermochemical* sebagai media penyimpanan panas masih dalam tahap pengembangan pada skala laboratorium dan prototipe.



PENYIMPANAN ENERGI TERMAL

A. PENGANTAR PENYIMPANAN ENERGI TERMAL

Penyimpanan energi termal secara umum sudah dilakukan sejak dahulu kala, baik dalam bentuk penyimpanan sebagai kondisi “panas” maupun penyimpanan sebagai kondisi “dingin”. Contoh penyimpanan energi termal sebagai kondisi “panas” adalah termos air panas dan penyimpanan energi termal sebagai kondisi “dingin” adalah kotak es. Penggunaan tanda petik pada kata “panas” dan “dingin” dimaksudkan untuk memberikan gambaran bahwa kedua kata tersebut bersifat relatif. Panas dan dingin merupakan representasi dari efek termal pada material. Panas identik dengan kondisi tinggi energi termal dan dingin identik dengan kondisi sebaliknya. Nilai yang direpresentasikan biasanya menggunakan indikator suhu.

Suhu sebagai indikator termal sifatnya relatif dan tidak bisa dinyatakan dalam nilai mutlak untuk menentukan kondisi suatu material. Misalnya, semua material yang bersuhu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ dianggap “dingin” dan jika material memiliki suhu di atas $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ dianggap “panas”.

Asumsi kondisi “dingin” dan “panas” merupakan kondisi yang sifatnya relatif, tergantung terhadap “apa” yang diukur dan “siapa” yang menjadi acuan atau pembanding. Untuk memberikan gambaran yang jelas, perhatikan dua klausa berikut:

Air murni (H_2O) membeku pada suhu $0\text{ }^{\circ}C$, Nitrogen (N) mendidih pada suhu $-195.8\text{ }^{\circ}C$; Air murni (H_2O) mendidih pada suhu $100\text{ }^{\circ}C$, Tungsten (W) membeku pada kisaran suhu $1,300\text{ }^{\circ}C$

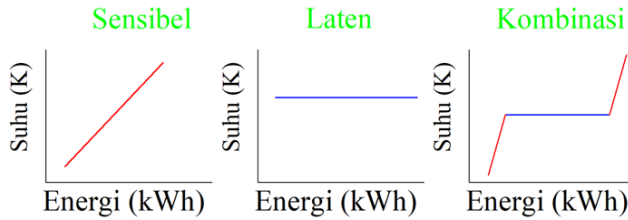
Klausula di atas menunjukkan dengan jelas bahwa representasi “panas” atau “dingin” merupakan hal yang relatif dan tidak bisa dijadikan sebagai nilai ukuran pasti.

Hal inilah yang mendasari penggunaan istilah penyimpanan energi “termal” bukan penyimpanan energi “panas”, karena pada prinsipnya ada dua kondisi penyimpanan termal yakni penyimpanan “panas” dan “dingin” yang didefinisikan dengan jelas pada indikator suhu tertentu. Sebagai contoh, penyimpanan dingin pada batasan titik beku air, refrigasi maupun *cryogenic*. Ketiga kondisi tersebut sama-sama dianggap sebagai kondisi dingin namun menggunakan nilai suhu yang jelas berbeda.

Sistem penyimpanan termal pada prinsipnya bertujuan untuk menjaga nilai termal pada suatu material penyimpanan atau sistem termal. Pada penyimpanan termal untuk kondisi panas, maka energi termal diusahakan masuk ke sistem sebesar-besarnya dan menghindari kerugian penyimpanan dalam bentuk kalor ke luar dari sistem. Sebaliknya, penyimpanan termal untuk kondisi dingin ditujukan agar energi termal tidak masuk ke sistem, dan menghindari kerugian penyimpanan dalam bentuk kalor masuk ke sistem.

Fokus pembahasan sekarang adalah penyimpanan energi termal untuk kondisi panas. Sebagai tambahan, istilah penyimpanan energi termal (*thermal energy storage*) dialamatkan untuk penyimpanan kondisi panas dan istilah penyimpanan kondisi dingin dialamatkan secara spesifik melalui istilah *cold energy storage* maupun *cold thermal energy storage*.

Pada bagian ini, istilah penyimpanan energi termal ditujukan untuk kondisi dingin dan panas. Energi termal dapat disimpan dengan cara menaikkan atau menurunkan suhu dari suatu material (diistilahkan sebagai panas sensibel), dengan cara merubah fase material tanpa menaikkan suhunya (diistilahkan dengan panas laten), maupun kombinasi keduanya. Gambar 7.1. menunjukkan model panas sensibel, laten dan kombinasi keduanya.



Gambar 7.1 Model grafik panas sensibel, laten dan kombinasi

Pada panas sensibel, perubahan suhu menyebabkan perubahan energi pada material tersebut, sedangkan pada panas laten, perubahan energi tidak bergantung pada perubahan suhu karena material sedang mengalami perubahan fase (misalnya mencair atau menguap). Secara umum, tiap material pasti mengalami bentuk kombinasi yakni sensibel dan laten, namun pada aspek penyimpanan energi, biasanya hanya satu aspek jenis panas yang digunakan paling utama, antara sensibel maupun laten.

Kedua metode penyimpanan kalor diharapkan dapat berguna bagi pengembangan sistem energi baru terbarukan. Penyimpanan energi termal merupakan penyimpanan sementara energi termal baik pada suhu rendah maupun tinggi yang untuk digunakan pada satu kondisi tertentu. Contoh dari aplikasi penyimpanan energi termal adalah penyimpanan energi panas matahari untuk digunakan pada malam hari, penyimpanan termal dari musim panas untuk digunakan sebagai penghangat pada musim dingin, atau menyimpan es dari musim dingin untuk digunakan sebagai pendingin ruangan saat musim panas. Pada aplikasi yang lebih maju, penyimpanan energi termal juga digunakan sebagai pembangkit listrik.

Penyimpanan energi termal dalam bentuk panas sensibel sangat menjanjikan untuk dijadikan sebagai media penyimpanan bersuhu tinggi dengan kapasitas besar pada aplikasi pembangkit listrik tenaga bahan bakar fosil. Sebagaimana umumnya pembangkit listrik tenaga uap yang menggunakan *boiler* untuk menghasilkan uap, maka energi termal yang disimpan dapat digunakan untuk memberikan panas pada *boiler*. Pada aplikasi tersebut, minyak merupakan media penyimpanan yang sangat menjanjikan dengan rentang suhu sensibel yang cukup panjang. Pada sistem pembangkitan listrik melalui proses termal (PLTU), penyimpanan

energi panas sangat mungkin diaplikasikan untuk memberikan panas bagi sistem sebelum proses konversi menjadi listrik.

Pada penyimpanan energi termal, nilai kualitas energi merupakan indikator penting yang dinilai berdasarkan suhu dari material yang masuk, keluar dan tersimpan pada penyimpanan. Sebagai contoh, 1 kWh energi dapat disimpan melalui pemanasan 1 ton air pada suhu $0.86\text{ }^{\circ}\text{C}$ atau dengan memanaskan 10 kg air pada suhu $86\text{ }^{\circ}\text{C}$. Meskipun kedua kasus di atas menunjukkan nilai energi yang sama (1 kWh), namun kecenderungan pada praktek pembangkitan listrik, penyimpanan pada suhu yang lebih tinggi (misalnya $86\text{ }^{\circ}\text{C}$) lebih disukai karena memungkinkan untuk beroperasi pada rentang suhu yang lebih tinggi.

Kebutuhan energi pada *sector* komersil, industri, utilitas, dan perumahan tiap waktu bervariasi, baik berdasarkan hari, minggu maupun musim. Sebagai contoh pada kasus perumahan, kebutuhan energi saat malam hari biasanya lebih tinggi dibandingkan siang hari atau kebutuhan energi saat akhir pekan maupun hari kerja pasti berbeda, dan khususnya pada negara sub tropis, kebutuhan energi saat musim panas akan berbeda dengan musim dingin. Penggunaan dari penyimpanan energi termal untuk keseluruhan aplikasi tersebut harus disesuaikan dengan karakteristik kebutuhan, kapasitas dan tentunya dapat bekerja secara sinergis untuk memaksimalkan potensi energi yang ada.

Aplikasi penyimpanan energi termal yang paling signifikan umumnya ditemukan pada aplikasi pemanas ruangan, pemanas air rumah tangga, pendingin ruangan, dan penyejuk udara. Sistem penyimpanan energi termal yang lebih maju juga mulai dilirik sebagai bidang yang sangat prospektif. Sistem penyimpanan energi termal maju antara lain untuk pembangkitan listrik tenaga termal, suplai kalor *boiler*, dan desalinasi. Banyaknya penelitian terkait dengan sistem penyimpanan energi termal secara khusus dikarenakan:

- a. Peluang penghematan energi untuk aplikasi pemanasan dan pendinginan skala perumahan
- b. Peluang penghematan bahan bakar fosil dengan sistem substitusi termal
- c. Meningkatkan faktor kapasitas sistem pembangkitan energi sistem solar termal.

Penyimpanan energi termal sebagaimana umumnya penyimpanan energi, memiliki parameter operasi tersendiri. Tabel 7.1. menyajikan parameter operasi sistem penyimpanan energi termal.

**Tabel 7.1 Perbandingan parameter operasi
penyimpanan energi termal [44]**

Metode	Kapasitas (kWh/t)	Daya (MW)	Efisiensi (%)	Periode penyimpanan	Biaya (€/kWh)
Sensibel	10–50	0.001–10	50–90	Hari/Bulan	0.1–10
Laten	50–150	0.001–1	75–90	Jam/Bulan	10–50
Termokimia	120–250	0.01–1	75–100	Jam/Hari	8–100

Dari Tabel 7.1. terlihat bahwa rentang nilai tiap parameter operasi sangat jauh. Hal ini merupakan suatu keniscayaan sebab penyimpanan energi termal lebih sulit diprediksi dibandingkan dengan penyimpanan energi lainnya. Contohnya adalah nilai kapasitas bergantung kepada karakteristik material dan siklus; daya bergantung pada desain alat penukar kalor, sehingga perlu ditulis dalam rentang nilai yang cukup jauh.

B. PENYIMPANAN PANAS SENSIBEL

Penyimpanan panas sensibel merupakan metode penyimpanan termal yang paling banyak digunakan dan sudah mencapai tahap komersialisasi yang tinggi. Sensibel energi menyimpan panas sebagai energi dalam di material dan meningkatkan suhu dari material tersebut. Selama menyerap energi panas, tidak ada perubahan kimia maupun perubahan fase pada material tersebut. Hal terpenting dari penyimpanan panas sensibel adalah panas spesifik (c_p) dari material yang digunakan. Panas spesifik ini berpengaruh terhadap besar kecilnya energi yang mampu disimpan oleh material. Pada aspek ini, terlihat jelas bahwa hal yang sangat penting dari penyimpanan panas sensibel adalah material yang digunakan.

Bagian yang paling kritis dari penyimpanan panas sensibel adalah pemilihan material yang sesuai dan karakteristik material untuk mampu mencapai tujuan dari penyimpanan dan pelepasan energi panas secara efektif. Material penyimpanan panas sensibel merupakan material yang dapat menyimpan dan melepaskan panas sesuai dengan permintaan, baik untuk penyimpanan jangka pendek maupun jangka panjang. Panas yang

diberikan oleh sistem diserap oleh material penyimpanan sehingga suhunya meningkat. Karena terjadi perubahan energi dalam pada material tersebut, energi yang disuplai tadi disimpan dalam bentuk panas sensibel dengan indikatornya adalah kenaikan suhu.

Berdasarkan durasi penyimpanan, sistem penyimpanan panas sensibel dibagi ke dalam dua model yakni penyimpanan jangka pendek dan penyimpanan jangka panjang. Penyimpanan jangka pendek biasanya ditargetkan untuk memenuhi kebutuhan pada saat beban puncak (misalnya penggunaan air panas pada beban listrik puncak) dalam durasi singkat yakni hanya beberapa jam saja. Pada kasus ini, energi termal bisa diperoleh dari sumber energi terbarukan maupun limbah panas yang kemudian disimpan pada material sensibel. Energi yang tersimpan kemudian digunakan kembali oleh sistem dan selanjutnya menunggu untuk diisi ulang setelah kembali ke suhu awal.

Secara umum, sistem penyimpanan jangka pendek ini menggunakan sumber energi masukan dari matahari. Energi panas dari matahari disimpan pada material padat (unit penyimpanan bebatuan) atau menggunakan material cair (biasanya air). Tipe Alat Penukar Kalor (APK) dapat disesuaikan berdasarkan kebutuhan desain, pertimbangan lokasi pemakaian, fluktuasi beban kerja, dan biaya.

Aplikasi lain berdasarkan durasi penyimpanan panas sensibel adalah untuk penyimpanan jangka panjang atau dikenal juga dengan penyimpanan antar musim. Penyimpanan antar musim ini sangat efektif untuk wilayah dengan iklim subtropis. Sebagai gambaran, energi panas yang tinggi saat musim panas dikumpulkan oleh pengumpul panas matahari (*solar collector*) dan disimpan pada material sensibel. Ketika memasuki musim dingin, panas yang disimpan tadi dilepas oleh sistem untuk digunakan pada berbagai aplikasi yang umumnya adalah pemanas ruangan dan penyediaan air hangat.

C. MATERIAL UNTUK PENYIMPANAN PANAS SENSIBEL

1. Sifat Material Penyimpanan Panas Sensibel

Penyimpanan panas sensibel sangat bergantung kepada karakteristik material yang digunakan [45], sehingga terdapat beberapa aspek sifat khusus dari material penyimpanan panas sensibel, yakni:

- a. Memiliki kapasitas penyimpanan panas yang tinggi berdasarkan volume dan massa material penyimpanan untuk mendukung unit penyimpanan yang kompak
- b. Memiliki konduktivitas termal yang tinggi pada suhu kerja yang digunakan
- c. Memiliki densitas yang baik untuk desain unit penyimpanan
- d. Memiliki kemampuan pengisian dan pelepasan energi yang baik saat proses pemakaian
- e. Usia pakai yang panjang, didukung dengan siklus pemakaian yang tinggi
- f. Efisiensi termal dan energi yang mumpuni
- g. Memiliki kemampuan *self-discharge* yang kecil sehingga kerugian penyimpanan dapat diminimalisir
- h. Stabilitas kimia yang baik, terhindar dari dekomposisi untuk pemakaian jangka panjang
- i. Aman digunakan (tidak beracun, tidak reaktif dan tidak korosif)
- j. Kompatibilitas yang baik dengan desain unit penyimpanan, stabil secara mekanis
- k. Koefisien muai termal rendah
- l. Dan yang paling utama, rendah biaya

2. Material Sensibel Padat

Material sensibel padat untuk penyimpanan panas sensibel umumnya digunakan untuk pemanasan ruangan (untuk musim dingin) dan juga untuk aplikasi pemanasan berbasis matahari. Rentang kerja untuk material padat yang menggunakan batuan maupun beton adalah 40–75 °C dan untuk basis logam biasanya digunakan hingga 150 °C [46]. Beberapa kekurangan pada penyimpanan panas sensibel menggunakan material padat antara lain:

- a. Memiliki panas spesifik yang rendah untuk penyimpanan panas sensibel dengan rerata panas spesifik hingga $\sim 1,200 \text{ kJ/m}^3\cdot\text{K}$
- b. Densitas energi yang tersimpan lebih kecil dibandingkan dengan penyimpanan basis material cair
- c. Memiliki risiko tinggi dari *self-discharge* energi panas yang tersimpan pada penyimpanan jangka panjang

- d. Stratifikasi dari unit penyimpanan
- e. Aspek biaya yang kurang kompetitif terkait dengan penggunaan dan perawatan dari unit penyimpanan

Fokus peningkatan kualitas dan pengembangan pada material padat untuk penyimpanan panas sensibel adalah:

- a. Mengurangi risiko kebocoran panas pada material untuk penyimpanan suhu tinggi
- b. Usia pakai dan ketersediaannya untuk digunakan pada aplikasi pembangkit tenaga panas berbasis matahari (*solar thermal*).

3. Material Cair

Material cair dapat digunakan sebagai penyimpanan panas dan juga digunakan sebagai media perpindahan panas. Pada aplikasinya, material cair telah digunakan secara luas untuk aplikasi penyimpanan energi panas suhu rendah hingga suhu menengah. Air merupakan material cair yang paling sering digunakan karena memiliki panas spesifik yang tinggi (4.2 kJ/kg.K), tersedia secara luas dan murah [47]. Sebagai contoh, densitas penyimpanan energi dari air sebagai media penyimpanan panas yang digunakan pada rentang suhu 70 °C dapat mencapai nilai energi hingga 290 MJ/m³. Kebanyakan aplikasi pada penyimpanan suhu menengah yang berhubungan dengan aplikasi penyimpanan energi panas berbasis panas matahari menggunakan air sebagai media penyimpanan.

D. TEKNOLOGI PENYIMPANAN PANAS SENSIBEL

Teknologi yang dimaksudkan adalah model dari sistem kerja unit penyimpanan energi. Tempat untuk material penyimpanan energi sering disebut dengan *bed storage*. Seperti halnya pada penyimpanan elektrokimia, dibutuhkan teknologi dan model tersendiri untuk memungkinkan terjadinya perpindahan energi. Perpindahan energi yang dimaksudkan pada semua sistem penyimpanan adalah:

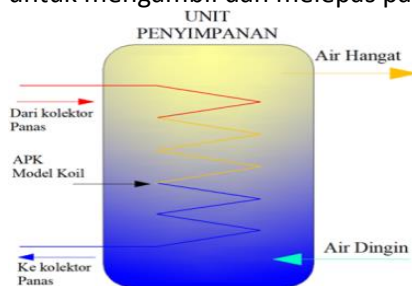
- a. *Charging*, energi masuk dari luar sistem penyimpanan ke *bed storage*
- b. *Storing*, energi disimpan pada material penyimpanan di *bed storage*
- c. *Discharging*, energi keluar dari *bed storage* ke sistem atau beban (biasa disebutkan dengan *load*).

Tiap-tiap teknologi pada sistem penyimpanan berbeda, dalam artian desain dan cara kerjanya, bergantung kepada jenis energi yang disimpan. Pada penyimpanan panas sensibel, karena energi yang keluar dan masuk adalah energi kalor, maka dibutuhkan alat penukar kalor pada sistem. Alat penukar kalor menentukan besar kecilnya efektivitas dari sistem penyimpanan panas. Berikut beberapa teknologi desain umum yang digunakan pada sistem penyimpanan panas sensibel.

1. Model Tangki Penyimpanan Air

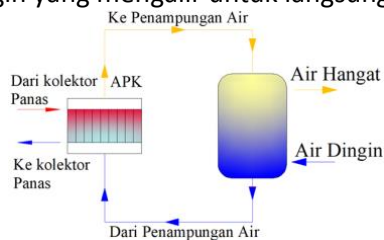
Air sebagaimana telah disebutkan sebelumnya merupakan media penyimpanan panas sensibel yang ideal dan sudah digunakan sejak lama, khususnya untuk aplikasi pada suhu rendah. Rentang suhu penggunaan air sebagai media penyimpanan panas sensibel biasanya pada rentang 20–80 °C. Kelebihannya adalah, pada rentang kerja tersebut, sudah banyak aplikasi dari penyimpanan panas sensibel yang dapat dikembangkan, khususnya untuk skala perumahan. Keuntungan lainnya adalah air dapat bekerja sebagai media perpindahan panas (*heat transfer fluid*, atau HTF) dan juga sebagai media penyimpanan itu sendiri. Hal ini disebabkan oleh panas spesifik yang tinggi dan juga karakteristik perpindahan panas konveksi yang baik.

Tangki penyimpanan air umumnya dibuat dari beberapa material, meliputi baja tahan karat, *aluminum*, beton yang diperkuat, dan *fiberglass*. Untuk meminimalisir kerugian saat penyimpanan panas, tangki penyimpanan biasanya menggunakan isolator. Bahan yang digunakan untuk isolator biasanya berasal dari wol mineral, wol kaca dan busa sintetis (*polyurethane foam*). Pada aplikasinya, air yang digunakan bisa saja diam pada tangki penyimpanan maupun bergerak ke pengumpul panas (*heat collector*) untuk mengambil dan melepas panas.



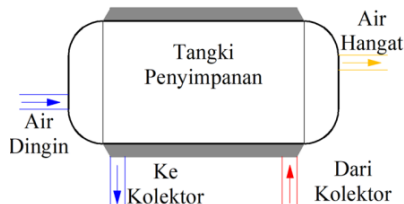
Gambar 7.2 Model tangki dengan APK rendam [48]

Terdapat beberapa model konfigurasi tangki penyimpanan yang umum digunakan pasaran seperti pada Gambar 7.2. Model tangki pada Gambar 7.2. menggunakan Alat Penukar Kalor model koil yang direndam pada tangki. Tangki berfungsi sebagai penampungan air dan juga tempat terjadinya perpindahan kalor. Model koil digunakan untuk memaksimalkan luasan area pertukaran kalor. Koil biasanya ditempatkan pada sisi bawah tangki untuk memaksimalkan perbedaan suhu antara air dingin dan air hangat. Meskipun memiliki beberapa keuntungan tersendiri, model ini cenderung lebih mahal dan terbatas pada penggunaan secara langsung untuk air dingin yang mengalir untuk langsung digunakan.



Gambar 7.3 Model tangki dengan APK di luar [49]

Gambar 7.3. menyajikan model penyimpanan panas sensibel dengan penggunaan alat penukar kalor di luar tangki. Model alat penukar kalor di luar (*external heat exchanger*) tangki aktif dikembangkan sejak beberapa tahun ke belakang. Dibandingkan dengan model koil rendam, model *external heat exchanger* lebih baik dengan pertimbangan desain yang lebih sederhana dan memungkinkan pada penggunaan lebih luas. Pada model ini, energi panas dari kolektor panas ditransfer secara tidak langsung menggunakan fluida kerja sendiri. Model ini secara umum lebih efisien, murah dan tangguh untuk digunakan pada pemakaian yang lama karena potensi pemisahan kalor (*thermal stratification*) yang lebih tinggi pada tangki penyimpanan.

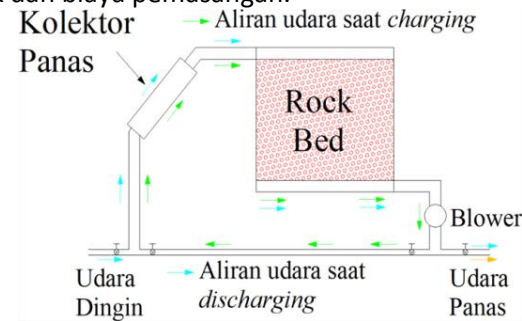


Gambar 7.4 Model tangki *mantle heat exchanger* [50]

Model umum lainnya yang digunakan adalah model tangki penyimpanan dengan menggunakan *mantle heat exchanger*. *Mantle heat exchanger* menyelimuti tangki penyimpanan sehingga model ini disebut dengan “mantel”. Kelebihan utama dari model ini adalah luas permukaan perpindahan panas yang tinggi meningkatkan secara signifikan efektivitas perpindahan panas dan juga performa dari penyimpanan energi termal. Namun, desain yang spesial serta pekerjaan pemasangan yang membutuhkan keahlian dan perlengkapan khusus membuat model tangki ini lebih mahal dibandingkan model-model sebelumnya.

2. Model *Bed Storage* dengan Bebatuan

Menyimpan energi panas melalui material padat, dalam hal ini batuan, merupakan metode yang sangat cocok untuk aplikasi perumahan, khususnya ketika menggunakan energi panas matahari sebagai sumber panas. Pada sistem penyimpanan panas melalui batuan (*rock bed*), tempat penyimpanan batuan dibuat lebih longgar untuk memungkinkan adanya interaksi antara udara dengan material (Gambar 7.5). Dengan menggunakan beberapa katup kontrol, aliran udara dapat dimanipulasi dengan hanya menggunakan satu buah blower untuk menghemat pemakaian listrik dan biaya pemasangan.



Gambar 7.5 Contoh model *rock bed storage* [50]

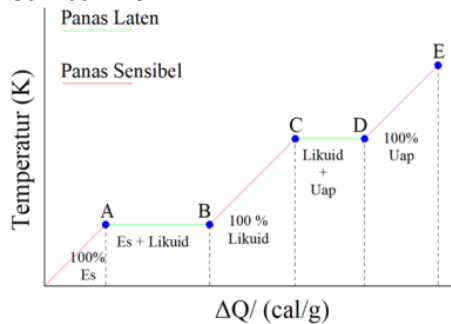
Sistem *rock bed* secara umum menggunakan udara sebagai media perpindahan panas. Saat *charging*, udara menyerap panas dari kolektor panas, kemudian membawanya ke susunan batuan (*rock bed*), sebagian dari energi panas tersebut diserap oleh batuan. Udara yang sudah hangat sebagian dimanfaatkan ke luar (udara panas) dan udara dingin masuk lagi

ke kolektor panas. Saat *discharging* (biasanya malam hari), udara dingin masuk ke *rock bed* dan mengambil panas yang tersimpan untuk dihembuskan menjadi udara hangat.

Prinsip kerja sistem *rock bed* sangat sederhana dan dapat dengan mudah digunakan. Permasalahannya adalah penggunaan udara sebagai media perpindahan panas dan juga batuan sebagai media penyimpanan panas menyebabkan densitas dan daya dari sistem ini lebih rendah dibandingkan dengan sistem tangki air atau yang menggunakan air. Sebagai perbandingan, untuk beban panas yang sama, maka dibutuhkan ukuran *rock bed* tiga kali lebih besar dibandingkan dengan sistem tangki air. Keuntungan utama adalah secara biaya yang lebih murah dan dimungkinkannya penggunaan pada suhu yang lebih tinggi (di atas 90 °C).

E. PENYIMPANAN PANAS LATEN

Penyimpanan panas laten bekerja dengan cara memanfaatkan sifat perubahan fase pada material penyimpanan selama proses *charging*, *storing* dan *discharging* dari energi. Perubahan fase terjadi sebagai sifat alami dari material pada kondisi isothermal maupun mendekati kondisi isothermal ideal. Sebagai gambaran, perhatikan perubahan fase pada air yang disajikan pada Gambar 7.6.

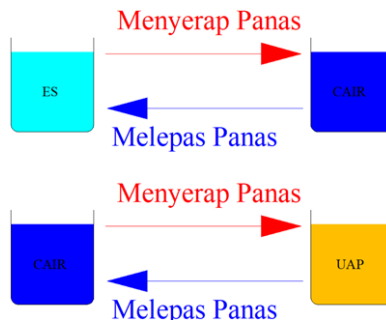


Gambar 7.6 Perubahan fase pada air

Garis hijau menunjukkan panas laten dimana tidak terjadi kenaikan temperatur (pada kasus isothermal ideal) namun terjadi perubahan fase dan kenaikan nilai energi (ΔQ). Pada panas sensibel, kenaikan nilai energi diiringi dengan kenaikan temperatur. Penjelasan perubahan dari titik A sampai dengan E adalah:

- Awal titik A, merupakan air dalam fase padat sepenuhnya (Es) dan merupakan panas sensibel yang berarti adanya kenaikan suhu
- Titik A - B merupakan panas laten, air mulai mencair dan terjadi perubahan fase. Pada titik A, air sepenuhnya padat (*saturated solid*) dan pada titik B air sepenuhnya likuid (*saturated liquid*)
- Pemanasan berlanjut, titik B–C menandakan panas sensibel dari air pada wujud cair
- Titik C - D merupakan panas laten, air mulai menguap dan terjadi perubahan fase. Pada titik D, air sepenuhnya cair (*saturated liquid*) dan pada titik D air sepenuhnya uap (*saturated vapor*).
- Pemanasan berlanjut, titik D - E menandakan panas sensibel dari air pada wujud uap.

Aplikasi dari penyimpanan panas laten umumnya memanfaatkan perubahan dari padat–padat, padat–cair, dan cair sepenuhnya. Fase uap pada panas laten tidak dimanfaatkan karena tingginya perubahan volume dan sangat sulit untuk dikendalikan, oleh karenanya, perubahan fase dibatasi hanya sampai titik awal penguapan (Titik C pada Gambar 7.6.). Hal yang penting untuk dipahami adalah proses interaksi panas dan perubahan fase yang kadang sering disalahartikan. Perhatikan Gambar 7.7. untuk skema interaksi panas dengan perubahan fase.



Gambar 7.7 Interaksi panas dan perubahan fase

Perubahan fase saat terjadi penyerapan panas adalah Padat > Cair > Uap, dan saat terjadi pelepasan panas, fase berubah dari Uap > Cair > Padat. Hal ini sangat penting untuk dipahami karena pada kasus panas

laten, perubahan nilai energi tidak berasosiasi dengan perubahan temperatur. Sebagaimana yang diperlihatkan pada Gambar 7.6., saat es mencair, tidak ada kenaikan suhu, yang berarti bisa saja air sepenuhnya cair pada suhu 0 °C dan sepenuhnya membeku pada suhu 0 °C.

Pada panas sensibel, aspek terpenting yang harus diketahui hanya perubahan temperatur dari material penyimpanan. Untuk panas sensibel, ada dua parameter penting yang harus diketahui yakni temperatur dan entalpi perubahan fase (ΔH) atau panas laten fusi. Fusi dalam hal ini berhubungan dengan peleburan (saat mencair) dan pembekuan (saat membeku). Tiap material memiliki nilai entalpi fusi tersendiri. Sebagai contoh, energi yang dibutuhkan untuk mencairkan es dari 0 °C sampai menjadi cair sepenuhnya pada suhu 0 °C adalah 334.92 kJ/kg. Nilai entalpi fusi sangat penting diketahui untuk sistem panas laten karena ini merupakan parameter utama dari sistem penyimpanan panas laten.

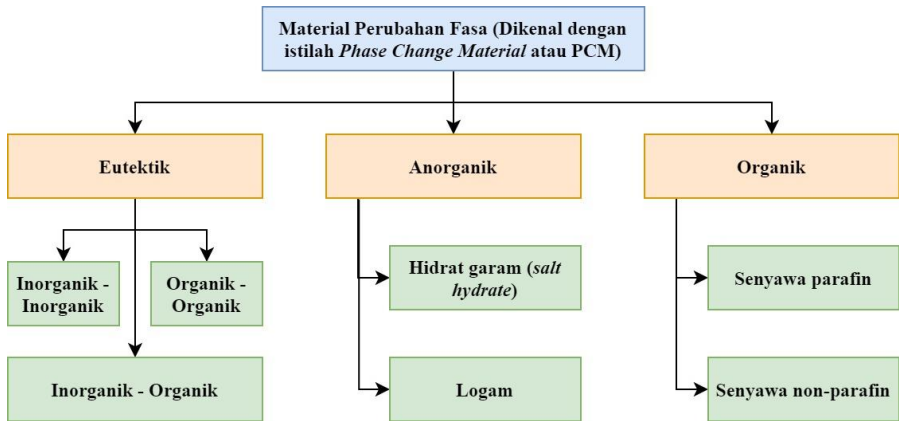
F. MATERIAL UNTUK PENYIMPANAN PANAS LATEN

1. Sifat Material Penyimpanan Panas Laten

Sebagaimana prinsip dari penyimpanan energi panas, maka material panas laten sangat bergantung kepada karakteristik bawaan dari material tersebut. beberapa sifat dari material penyimpanan panas laten yang harus dipertimbangkan antara lain [51]:

- a. Sifat termofisik material, berkaitan dengan nilai entalpi fusi, konduktivitas termal pada tiap fase dan gabungan, perubahan densitas dan volume saat terjadi perubahan fase
- b. Kinetik dan sifat kimia, berhubungan erat dengan fenomena *supercooling* dan *subcooling*, stabilitas kimia dan komposisi untuk jangka panjang (siklus), kesesuaian antara material dengan wadah penampungan (korosifitas), tidak beracun dan tidak berbahaya (khususnya material yang mudah terbakar)
- c. Pertimbangan ekonomis.

Klasifikasi dari material panas laten ditentukan berdasarkan kapabilitas perubahan fisik selama proses penyerapan dan pelepasan panas. Gambar 7.8. menyajikan bagan klasifikasi material panas laten yang digunakan pada rentang fase padat–cair.



Gambar 7.8 Klasifikasi material panas laten [51]

Masing-masing material memiliki karakteristik tersendiri yang disesuaikan dengan tujuan aplikasinya. Karakteristik tersebut juga mengacu kepada kesesuaian antara aplikasi dan jenis material yang digunakan, sifat material dan cakupan temperatur kerja.

2. PCM Basis Eutektik

Material eutektik merupakan kombinasi dari dua atau lebih material dengan titik leleh rendah yang memiliki kesamaan (*kongruen*) titik leleh dan beku. Eutektik meleleh dan membeku dengan sangat sedikit kemungkinan atau tanpa sama sekali ada segregasi, memiliki konduktivitas termal dan densitas yang tinggi. Persentase berat dari tiap material bervariasi untuk mendapatkan nilai campuran eutektik. Karakteristik khusus ini yang membuat PCM basis eutektik banyak menarik perhatian para peneliti, meskipun pada beberapa aspek material ini kurang disenangi karena memiliki kalor laten dan kalor spesifik yang rendah.

3. PCM Basis Organik

Karakteristik utama dari organik PCM adalah kemampuannya untuk berulang kali mencair dan membeku tanpa mengalami pemisahan (*segregasi*) fase. Degradasi panas laten cair membuat organik PCM hanya mengalami sedikit atau tidak sama sekali fenomena *supercooling* saat proses kristalisasi. Terdapat dua kategori utama dari organik PCM, yakni:

- a. Lilin parafin yang kebanyakan terdiri dari rantai lurus alkena— $n \text{ CH}_3\text{—}(\text{CH}_2)\text{—}(\text{CH}_3)$. Kristalisasi dari rantai (CH_3) mampu melepaskan sejumlah besar panas. Titik leleh dan panas laten fusi keduanya dipengaruhi oleh panjang rantai sehingga semakin panjang susunan rantai ikatan maka kedua nilai tersebut akan meningkat. Parafin cenderung aman, dapat diandalkan, mudah diprediksi saat bekerja, murah, tidak meledak, dan tersedia pada rentang suhu yang cukup luas yakni $5\text{--}80^\circ\text{C}$
- b. Senyawa PCM *non* parafin merupakan PCM yang tersedia dalam jumlah besar dan banyak ragamnya. Tiap jenis memiliki sifatnya tersendiri. Sejumlah besar jenis ester, asam lemak (*fatty acid*), alkohol dan glikol cocok digunakan untuk penyimpanan energi. Karakteristik utama dari senyawa PCM *non* parafin adalah panas laten fusi yang tinggi, tidak terbakar, konduktivitas termal yang rendah, titik nyala rendah, dan kurang stabil saat temperatur tinggi.

4. PCM Basis Anorganik

PCM basis anorganik kebanyakan digunakan untuk aplikasi suhu tinggi dan merupakan jenis PCM yang memiliki banyak tantangan dalam proses perawatannya. Pada suhu rendah, PCM ini membeku, pada suhu tinggi, stabilitas PCM rendah membuatnya sulit diatur. PCM anorganik nyaris tidak mengalami *supercooling* dan entalpi leburnya tidak berubah akibat pengaruh siklus. Terdapat dua jenis PCM anorganik yakni:

a. Hidrat Garam (*Salt Hydrate*)

Garam hidrat telah dipelajari secara mendalam untuk aplikasi penyimpanan panas karena memiliki beberapa keuntungan, diantaranya: memiliki panas laten yang tinggi per satuan volume, konduktivitas termal yang lebih tinggi dibandingkan parafin, korosifitas rendah dan kompatibilitas yang baik dengan wadah plastik. Di sisi lain, garam hidrat juga memiliki beberapa kekurangan, seperti proses meleleh yang tidak merata dan *supercooling*. Beberapa penelitian difokuskan untuk mengembangkan garam hidrat berbasis magnesium sulfat ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), *cupric sulfate* ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) dan *gypsum* ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

b. Logam

Logam yang dimaksudkan adalah logam dengan kategori titik leleh rendah, seperti galium, natrium dan bismut. Kategori ini juga termasuk dari paduan logam yang memiliki titik leleh rendah. Pada aplikasinya, logam jarang digunakan sebagai media penyimpanan panas karena nilai entalpi leleh yang rendah per satuan massa, meskipun memiliki nilai entalpi leleh yang tinggi per satuan volume dan konduktivitas termal yang baik. Tabel 7.2. menunjukkan beberapa kategori logam dengan titik leleh rendah.

Tabel 7.2 Nilai suhu dan entalpi leleh dari beberapa logam [51]

No.	Material	Titik Leleh (°C)	Kalor Laten (kJ/kg)
1	Galium–Galium antimoni eutektik	29.8	-
2	Galium	30.0	80.3
3	Cerro–eutektik rendah	58.0	90.9
4	Bi–Cd–In eutektik	61.0	25.0
5	Bi–Pb–In eutektik	70.0	29.0
6	Bi–In eutektik	72.0	25.0
7	Bi–Pb eutektik	125.0	-



PENYIMPANAN HIDROGEN

A. PENGANTAR HIDROGEN

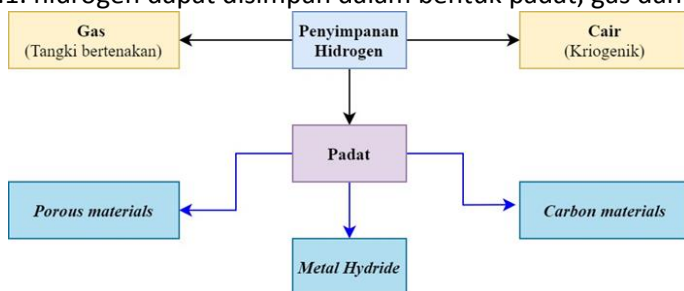
Poin yang paling penting untuk ditekankan adalah hidrogen bukan termasuk kategori bahan bakar seperti minyak dan batu bara. Hidrogen, seperti halnya listrik, merupakan *energy carrier* (pembawa energi) seperti elektron pada listrik, sehingga hidrogen harus dibangkitkan atau dihasilkan menggunakan sumber daya yang lain. Hidrogen merupakan elemen paling banyak yang ada di bumi, namun masalahnya dalam perspektif energi, hidrogen ditemukan dalam kondisi terikat dengan senyawa atau molekul lain, seperti hidrokarbon dan air.

Terdapat tiga isotop hidrogen yakni hidrogen atau protium (H), deuterium (D), dan tritium (T) yang bersifat radioaktif. Seluruh jenis isotop terbentuk dalam ikatan molekul, yakni H_2 , D_2 dan T_2 karena memiliki elektron tunggal. Hidrogen memiliki sifat ambivalen terhadap elemen lain, misalnya hidrogen dapat hadir dalam bentuk anion (H^-) atau kation (H^+) pada senyawa ion, atau bisa menghasilkan ikatan kovalen, misalnya dengan karbon, dan bahkan dapat bersifat seperti logam dan mengikat dengan logam untuk menghasilkan paduan atau senyawa intermetalik pada suhu ruang [52].

Hidrogen sebagai pembawa energi, memiliki tiga komponen yang mengikat yakni produksi, penyimpanan dan distribusi. Banyak cara untuk memproduksi hidrogen, dan yang paling umum adalah *steam reformer*. Beberapa cara alternatif lainnya adalah elektrolisis dengan memecah

molekul air menjadi H_2 dan O . Meskipun menjadi isu tersendiri, pengembangan produksi hidrogen dilakukan dengan cara memanfaatkan energi baru terbarukan dan meminimalisir jejak karbon. Fokus awal pembahasan pada bagian ini adalah penyimpanan hidrogen.

Menyimpan hidrogen merupakan tantangan tersendiri. Hal ini didasari oleh sifat hidrogen yang sangat reaktif dan memiliki densitas rendah. Sebagai gambaran, untuk menyimpan 1 kg gas hidrogen murni pada kondisi STP (*Standard Temperature and Pressure*, kondisi yang merujuk pada tekanan dan suhu ruang) dibutuhkan ruang 11 m^3 . Beberapa metode dapat dilakukan untuk menyimpan hidrogen (Gambar 8.1.). Terlihat pada Gambar 8.1. hidrogen dapat disimpan dalam bentuk padat, gas dan cair.



Gambar 8.1 Metode penyimpanan hidrogen [53]

Tujuan utama dari seluruh penyimpanan hidrogen adalah menyimpan hidrogen sebanyak mungkin dengan volume (*volumetric*) dan atau massa (*gravimetric*) serendah mungkin. Penyimpanan hidrogen menyebabkan penurunan volume yang signifikan dari gas hidrogen, oleh karenanya tiap penyimpanan memerlukan metode dan cara tersendiri. Untuk menaikkan densitas hidrogen, maka kerja harus dilakukan untuk menekan gas hidrogen (penyimpanan dalam bentuk gas) atau menurunkan suhu hidrogen (penyimpanan cair). Metode alternatif dalam penyimpanan adalah dengan menurunkan tingkat *repulsion* (gaya tolak-menolak antar molekul) molekul H_2 melalui reaksi dengan logam.

Penyimpanan hidrogen pada prinsipnya merupakan tantangan dari ilmu material. Pernyataan tersebut didasari dari metode-metode yang sedang dikembangkan saat ini fokus pada material untuk penyimpanan hidrogen, meskipun tetap ada beberapa pengembangan terkait dengan penyimpanan hidrogen konvensional melalui gas bertekanan dan

kriogenik. Sifat mampu balik penyimpanan hidrogen merupakan aspek terpenting yang menjadi indikator awal untuk penyimpanan. Sifat mampu balik harus diperhitungkan pada dua aspek kerja yakni saat pelepasan dan penyerapan hidrogen. Untuk memberikan gambaran tentang karakteristik hidrogen sebagai *energy carrier*, Tabel 8.1. menyajikan data perbandingan antara hidrogen dengan beberapa bahan bakar umum.

Tabel 8.1 Perbandingan sifat hidrogen dengan gas metana dan bensin [52]

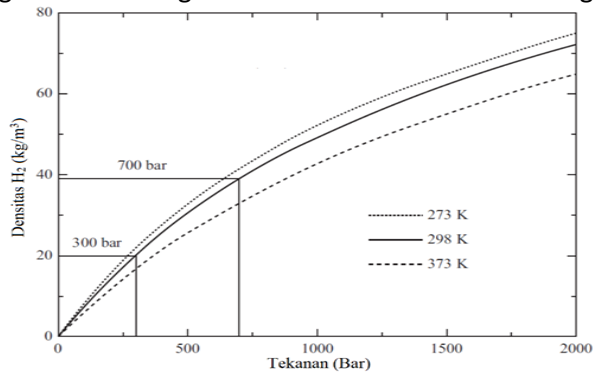
Sifat	Hidrogen (H ₂)	Gas Metana (CH ₄)	Bensin -(CH ₂) _n -
<i>Lower heating value</i> (kWh/kg)	33.33	13.9	12.4
Suhu nyala sendiri (K)	858	813	498–774
Suhu lidah api (K)	2318	2148	2473
<i>Flammability limit</i> (% vol)	4–75	5.3–15	1.0–7.6
Energi penyulutan minimal (mW)	0.02	0.29	0.24
Kecepatan nyala (<i>flame propagation</i>) (m/s)	0.02	0.4	0.4
Energi ledak (kg TNT/m ³)	2.02	7.03	44.22
Koefisien difusi di udara (cm ² /s)	0.61	0.16	0.05

Sebagai catatan tambahan terkait sifat mampu bakar hidrogen, dari Tabel 8.1. terlihat bahwa hanya dibutuhkan sedikit energi penyulutan untuk membuat hidrogen terbakar di udara bebas.

B. PENYIMPANAN HIDROGEN MELALUI GAS BERTEKANAN

Penyimpanan hidrogen melalui gas bertekanan merupakan metode yang paling umum digunakan. Silinder baja digunakan sebagai media penyimpanan dengan tekanan kerja maksimal 200 bar. Penyimpanan sepenuhnya bergantung kepada kekuatan tarik material. Komposit terbaru yang dikembangkan dari material ringan mampu bekerja hingga tekanan 800 bar. Pada tekanan 800 bar, hidrogen mampu mencapai densitas volumetrik hingga 36 kg/m³, hampir setengah dari densitas volumetrik

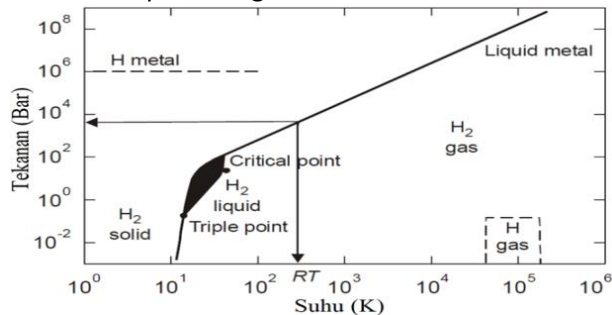
hidrogen cair. Gambar 8.2. menyajikan hubungan antara densitas dan tekanan hidrogen untuk mengetahui densitas volumetrik hidrogen.



Gambar 8.2 Hubungan densitas dan tekanan hidrogen [54]

Kenaikan tekanan tidak menunjukkan hubungan yang linear dengan kenaikan densitas volumetrik hidrogen. Gambar 8.2. juga memberikan informasi bahwa densitas volumetrik yang tinggi dapat diperoleh dengan cara menaikkan tekanan hidrogen secara signifikan. Misalnya, densitas volumetrik hidrogen bervariasi antara 40–70 kg/m³ dengan tekanan kerja antara 700–2000 bar. Namun, tekanan tinggi mengharuskan silinder yang sangat kuat, penggunaan kompresor khusus, dibutuhkan energi tinggi untuk memampatkan hidrogen dan rawan ledakan sehingga secara teknis hal ini tidak layak.

Gambar 8.3. menyajikan model ilustrasi diagram fase dari hidrogen. Diagram fase dapat memberikan informasi penting terkait dengan karakteristik dari elemen pada fungsi suhu dan tekanan.



Gambar 8.3 Diagram fase hidrogen [52]

Hidrogen menjadi padat pada suhu 14 K (Sekitar $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$) dan dapat mencapai densitas hingga 70.6 kg/m^3 . Sebagai perbandingan, pada suhu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan tekanan ruang, densitas hidrogen hanya 0.089886 kg/m^3 . Hidrogen menjadi cair pada area yang kecil di antara *triple point* dan *critical point* (Gambar 8.3.) dengan densitas 70.8 kg/m^3 .

C. PENYIMPANAN HIDROGEN CAIR MELALUI KRIOGENIK

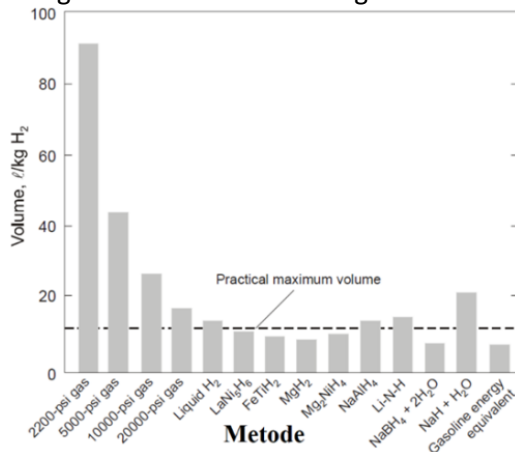
Upaya penyimpanan yang paling umum berikutnya adalah penyimpanan hidrogen cair. Penyimpanan metode ini mampu menaikkan densitas volumetrik hidrogen, dilakukan dengan cara menurunkan suhu hidrogen pada tekanan tetap (biasanya pada tekanan ruang). Hidrogen cair disimpan pada tanki kriogenik pada suhu $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$ (21 K). Suhu kritis (*critical point*) yang sangat rendah pada hidrogen ($-240\text{ }^{\circ}\text{C}$ atau 33 K) menyebabkan penyimpanan hidrogen hanya dapat dilakukan pada sistem terbuka karena tidak ada fase cair di atas suhu kritis dan adanya kehilangan dalam kuantitas kecil secara kontinu. Tekanan pada sistem tertutup pada suhu ruang dapat meningkat hingga 104 bar. Siklus likuifaksi hidrogen yang paling sederhana adalah siklus Linde, berdasarkan efek Joule–Thomson [10].

D. PENYIMPANAN HIDROGEN PADAT

Penyimpanan hidrogen menggunakan metode gas bertekanan dan cairan berdampak pada kerugian energi yang cukup signifikan yakni 10% untuk gas bertekanan dan 30% untuk likuifaksi. Sebagai alternatif, hidrogen dapat disimpan dalam bentuk padat dengan bantuan media lain untuk membentuk senyawa hidrida (*hydride*). Dari beberapa opsi penyimpanan hidrogen padat, buku ini fokus membahas untuk penyimpanan hidrogen melalui senyawa logam hidrida (*metal hydride*) [55].

Hidrogen dapat terikat secara kimia dan tersimpan pada senyawa dalam bentuk padat, misalnya logam hidrida. Logam hidrida dapat melepaskan kembali hidrogen yang tersimpan pada suhu dan tekanan hidrogen yang relatif rendah (2–3 bar). Logam hidrida secara umum tergolong sebagai media penyimpanan hidrogen mampu balik (*reversible storage*). Keuntungan utama dari penyimpanan hidrogen melalui logam

hidrida adalah volume yang relatif lebih kecil dapat menyimpan hidrogen lebih banyak dibandingkan dalam bentuk hidrogen cair.



Gambar 8.4 Perbandingan kapasitas penyimpanan hidrogen [56]

Gambar 8.4. menyajikan beberapa perbandingan metode penyimpanan hidrogen beserta densitasnya. Terlihat bahwa volume penyimpanan bukan masalah bagi penyimpanan melalui logam hidrida. Lebih lanjut, pada tekanan yang relatif sangat rendah untuk sistem hidrogen (hanya beberapa bar), beberapa hidrida misalnya LaNi₅H₆ dapat melepas hidrogen pada kisaran suhu ruang. Kemampuan kinetik dari hidrida tersebut juga cukup mumpuni karena dapat dihidridasi dan dehidridasi kembali dalam waktu 5–10 menit (bergantung volume). Terlepas dari seluruh kelebihan tersebut, tantangan utama penyimpanan hidrogen padat melalui logam hidrida adalah massa. Sebagai contoh, kapasitas gravimetrik hidrogen pada LaNi₅H₆ hanya 1.4 wt% (wt% adalah persen berat), berarti untuk menyimpan 5 kg hidrogen dibutuhkan 360 kg LaNi₅H₆. Hal tersebut sangat tidak ekonomis, terlebih untuk digunakan pada aplikasi bergerak seperti kendaraan *fuel cell*. Sebagai perbandingan dengan bensin, 1 kg hidrogen memiliki energi yang sama dengan 8.2 liter bensin.

E. PRODUKSI HIDROGEN

Terdapat alasan tersendiri mengapa hidrogen sangat diminati dan dikembangkan secara signifikan pada bidang rekayasa energi. Pengembangan hidrogen dimotivasi karena hidrogen merupakan energi bersih, ringan dan sangat efisien. Hidrogen merupakan energi alternatif masa depan yang ditargetkan dapat dengan mudah disimpan dan digunakan, seperti halnya bahan bakar minyak dan gas pada era sekarang. Hidrogen tidak ada di alam bebas secara alami sehingga hidrogen harus diproduksi terlebih dahulu menggunakan sumber energi yang ada saat ini.

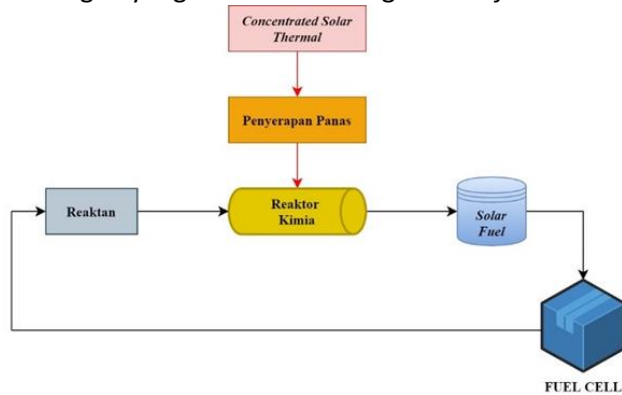
Pada masa sekarang, kebanyakan sumber hidrogen diperoleh dari gas metana maupun sumber bahan bakar fosil lainnya. Target yang paling diinginkan adalah produksi hidrogen dari air. Hidrogen bisa diproduksi dari air dengan memberinya sejumlah energi untuk memecah molekul air (H_2O) menjadi gas hidrogen (H_2) dan Oksigen (O). Salah satu metode yang paling sederhana untuk memproduksi hidrogen dari air adalah menggunakan elektrolisis (*electrolysis*).

Elektrolisis air merupakan proses yang sederhana yakni tegangan diberikan untuk elektroda positif dan negatif yang direndam air. Selama pemberian tegangan, muncul gelembung air; hidrogen pada elektroda negatif dan oksigen pada elektroda positif. Pada sebuah sistem elektrolisis yang efektif, dibutuhkan 94 kWh energi untuk memproduksi 28.3 m^3 hidrogen (pada tekanan atmosfer). Energi listrik yang dibutuhkan hanya 79 kWh sedangkan sisanya bisa menggunakan energi panas (kalor).

Air dapat dipecah secara langsung menggunakan energi panas. Dekomposisi molekul air menjadi gas hidrogen dan oksigen membutuhkan suhu sekitar $2,500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Permasalahannya adalah bagaimana cara yang efektif untuk mendapatkan suhu tinggi tersebut. Suhu tersebut belum tersedia secara efektif untuk produksi hidrogen menggunakan sumber termal yang ada, misalnya reaktor nuklir. Alternatif yang masih mungkin dilakukan adalah dengan menggunakan reaktor fusi maupun reaktor fisi berpendingin gas. Namun, seluruh konsep pemanasan langsung tersebut tidak bersifat praktis.

Pendekatan untuk produksi hidrogen yang lebih praktis dan mungkin dikembangkan untuk produksi skala besar menggunakan energi panas adalah proses termokimia. Pada proses termokimia, beberapa reaksi kimia

berantai terjadi dengan menggunakan energi panas sebagai energi masukan (endotermik). Sumber energi ini dapat diperoleh dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan yang berasal dari matahari. Konsep produksi ini dikenal dengan istilah *solar hydrogen production*. *Solar hydrogen production* dapat menggunakan reaksi kimia untuk menghasilkan hidrogen yang diistilahkan dengan *solar fuel*.



Gambar 8.5 Skema proses produksi *solar hydrogen* [30]

Konsep produksi *solar hydrogen* berasal dari prinsip sederhana untuk memanfaatkan panas matahari dengan suhu tinggi. Suhu tinggi dapat diperoleh dengan menggunakan *concentrated solar power*. Panas ini digunakan untuk menggerakkan reaksi kimia endotermik maupun untuk reaksi lain sebagai pendukung untuk menghasilkan hidrogen. Gambar 8.5. menyajikan skema produksi *solar hydrogen* dengan reaksi kimia. Panas matahari dikumpulkan menggunakan *solar concentrator* (misalnya *parabolic dish*) dan digunakan untuk menggerakkan reaksi kimia menggunakan reaktan tertentu. Dengan menggunakan reaktan yang sesuai, hidrogen dapat dihasilkan dengan memanfaatkan panas matahari untuk mendapatkan "*solar fuel*".

DAFTAR PUSTAKA

- I. M. Sefton, "Understanding Energy," vol. 77, no. 12. p. 52, 2001.
- Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, vol. 8. Elsevier Ltd, 2015.
- T. Jantz-Sell, "The Light Bulb Revolution," 2017.
- M. J. Moran, H. N. Shapiro, B. R. Munson, and D. P. DeWitt, *Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer*, vol. 1, 2003.
- W. W. Pulkrabek, *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*, vol. 10, no. October 2018. Elsevier, 2004.
- A. A. Hawwash, H. Hassan, and K. El feky, "Impact of reactor design on the thermal energy storage of thermochemical materials," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 168, p. 114776, 2020.
- B. Ruscic and D. H. Bross, *Thermochemistry*, vol. 45. 2019.
- B. Akhmetov, A. G. Georgiev, A. Kaltayev, A. A. Dzhomartov, R. Popov, and M. S. Tungatarova, "Thermal energy storage systems - Review," *Bulg. Chem. Commun.*, vol. 48, no. November, pp. 31–40, 2016.
- Y. Simsek, D. Watts, and R. Escobar, "Sustainability evaluation of Concentrated Solar Power (CSP) projects under Clean Development Mechanism (CDM) by using Multi Criteria Decision Method (MCDM)," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 93, no. April, pp. 421–438, 2018.
- İ. Dinçer and M. A. Rosen, *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. 2011.
- R. Ling-zhi, Z. Xin-gang, Z. Yu-zhuo, and L. Yan-bin, "The economic performance of concentrated solar power industry in China," *J. Clean. Prod.*, vol. 205, pp. 799–813, 2018.
- J. A. Muslim and L. M. Firman, "Studi Simulasi Pengaruh dari Pitch dan Kecepatan Alir Fluida Kerja Terhadap Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh di Conical Cavity Absorber," *Teknobiz J. Ilm. Progr. Stud. Magister Tek. Mesin*, vol. 10, no. 3, pp. 25–31, 2020.

- B. Ghorbani, K. B. Mahyari, M. Mehrpooya, and M. H. Hamed, "Introducing a hybrid renewable energy system for production of power and fresh water using parabolic trough solar collectors and LNG cold energy recovery," *Renew. Energy*, vol. 148, pp. 1227–1243, 2020.
- M. Salauddin, M. S. Rasel, J. W. Kim, and J. Y. Park, "Design and experiment of hybridized electromagnetic-triboelectric energy harvester using Halbach magnet array from handshaking vibration," *Energy Convers. Manag.*, vol. 153, no. July, pp. 1–11, 2017.
- M. Mehrpooya, B. Ghorbani, and M. Moradi, "A novel MCFC hybrid power generation process using solar parabolic dish thermal energy," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 16, pp. 8548–8565, 2019.
- A. Kasaieian, F. Rajaei, and W. M. Yan, "Osmotic desalination by solar energy: A critical review," *Renew. Energy*, vol. 134, pp. 1473–1490, 2019.
- J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, vol. 82, no. 2124. 1988.
- M. J. Piernas Muñoz and E. Castillo Martínez, "Introduction to batteries," 2018.
- EASE - European Association for Energy Storage, "Energy Storage Technology Descriptions - Pumped Hydro Storage," 2011.
- C. Iclodean, B. Varga, N. Burnete, D. Cimerdean, and B. Jurchiş, "Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 252, no. 1, p. 012058, 2017.
- M. Morris, "Comparison of Rechargeable Battery Technologies," *ASME Early Career Tech. J.*, no. November 2012, pp. 1-5, 7, 2012.
- F. Kreith, R. M. Manglik, and M. S. Bohn, *Principles of Heat Transfer, Seventh Edition*. 2011.
- Y. Miao, P. Hynan, A. Von Jouanne, and A. Yokochi, "Current li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements," *Energies*, vol. 12, no. 6, pp. 1–20, 2019.
- A. Yushchenko, A. de Bono, B. Chatenoux, M. K. Patel, and N. Ray, "GIS-based assessment of photovoltaic (PV) and concentrated solar power (CSP) generation potential in West Africa," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. June, pp. 2088–2103, 2018.

- F. Sutter, A. Fernández-García, J. Wette, T. J. Reche-Navarro, and L. Martínez-Arcos, "Acceptance criteria for accelerated aging testing of silvered-glass mirrors for concentrated solar power technologies," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 193, no. January, pp. 361–371, 2019.
- G. Hailu, P. Hayes, and M. Masteller, "Seasonal solar thermal energy sand-bed storage in a region with extended freezing periods: Part I experimental investigation," *Energies*, vol. 10, no. 11, 2017.
- R. Chacartegui, A. Alovísio, C. Ortiz, J. M. Valverde, V. Verda, and J. A. Becerra, "Thermochemical energy storage of concentrated solar power by integration of the calcium looping process and a CO₂ power cycle," *Appl. Energy*, vol. 173, pp. 589–605, 2016.
- T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D. P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, vol. 7, no. 9. 2011.
- B. Sivapalan, M. Neelesh Chandran, S. Manikandan, M. K. Saranprabhu, S. Pavithra, and K. S. Rajan, "Paraffin wax–water nanoemulsion: A superior thermal energy storage medium providing higher rate of thermal energy storage per unit heat exchanger volume than water and paraffin wax," *Energy Convers. Manag.*, vol. 162, no. December 2017, pp. 109–117, 2018.
- R. Dufo-López, T. Cortés-Arcos, J. S. Artal-Sevil, and J. L. Bernal-Agustín, "Comparison of lead-acid and li-ion batteries lifetime prediction models in stand-alone photovoltaic systems," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 3, pp. 1–16, 2021.
- S. Kalaiselvam, R. Parameshwaran, S. Kalaiselvam, and R. Parameshwaran, "Chapter 2 – Energy Storage," in *Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability*, 2014, pp. 21–56.
- C. Ziebert, A. Melcher, B. Lei, W. Zhao, M. Rohde, and H. J. Seifert, *Electrochemical-Thermal Characterization and Thermal Modeling for Batteries*. Elsevier Inc., 2017.
- G. Giordano, *Electric vehicles*, vol. 161, no. 3. 2018.
- R. R. Gaddam, N. A. Kumar, R. Narayan, K. V. S. N. Raju, and X. S. Zhao, *Advanced carbon materials for electrochemical energy storage*. Elsevier Inc., 2019.
- B. Sundén, *Battery technologies*. 2019.

- F. Torabi and P. Ahmadi, *Fundamentals of batteries*. 2020.
- F. Torabi and P. Ahmadi, *Lead–acid batteries*. 2020.
- Z. Melhem, *Electricity Transmission, Distribution and Storage Systems*, no. March 1899. Woodhead Publishing Limited, 2013.
- G. dos Reis, C. Strange, M. Yadav, and S. Li, “Lithium-ion battery data and where to find it,” *Energy AI*, vol. 5, p. 100081, 2021.
- V. Kumar, Y. Wang, A. Y. S. Eng, M. F. Ng, and Z. W. Seh, “A Biphasic Interphase Design Enabling High Performance in Room Temperature Sodium-Sulfur Batteries,” *Cell Reports Phys. Sci.*, vol. 1, no. 5, p. 100044, 2020.
- P. Rasoulnia, R. Barthen, J. A. Puhakka, and A. M. Lakaniemi, “Leaching of rare earth elements and base metals from spent NiMH batteries using gluconate and its potential bio-oxidation products,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 414, no. February, p. 125564, 2021.
- E. Karden, *Development trends for future automobiles and their demand on the battery*. Elsevier B.V., 2017.
- D. Rahmalina, R. A. Rahman, A. Suwandi, and Ismail, “The recent development on MgH₂ system by 16 wt% nickel addition and particle size reduction through ball milling: A noticeable hydrogen capacity up to 5 wt% at low temperature and pressure,” *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 53, pp:29046-58, 2020.
- A. Kribus and M. Epstein, *Thermochemically regenerative flow batteries for solar electricity generation and storage*. LTD, 2021.
- H. Kerskes, *Thermochemical Energy Storage*. 2016.
- Delta Energy & Environment Ltd, *Evidence Gathering: Thermal Energy Storage (TES) Technologies*, vol. 80. 2016.
- C. Ann Cruickshank and C. Baldwin, *Sensible Thermal Energy Storage: Diurnal and Seasonal*. Elsevier Inc., 2016.
- A. Elouali *et al.*, “Physical models for packed bed: Sensible heat storage systems,” *J. Energy Storage*, vol. 23, no. March, pp. 69–78, 2019.
- P. M. Gerhart, A. I. Gerhart, and J. I. Hochstein, *Fundamentals of Fluid Mechanics (Eight Edition)*, vol. 8. Elsevier, 2016.
- S. Mandal and S. K. Ghosh, “Experimental investigation of the performance of a double pass solar water heater with reflector,” *Renew. Energy*, vol. 149, pp. 631–640, 2020.

- A. Naidoo, "The socio-economic impacts of solar water heaters compared across two communities: A case study of Cato Manor," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, no. October 2019. Elsevier Ltd, p. 109525, 2020.
- G. L. Morrison, G. Rosengarten, and M. Behnia, "Mantle heat exchangers for horizontal tank thermosyphon solar water heaters," *Sol. Energy*, vol. 67, no. 1–3, pp. 53–64, 1999.
- D. C. Adhitya, D. Rahmalina, Ismail, M. Nurtanto, and H. Abdillah, "Thermal Enhancement for Paraffinic Thermal Energy Storage by Adding Volcanic Ash," *VANOS J. Mech. Eng. Educ.*, vol. 6, no. 1, pp. 77–88, 2021.
- I. Sarbu and C. Sebarchievici, "A comprehensive review of thermal energy storage," *Sustain.*, vol. 10, no. 1, 2018.
- B. Viswanathan, *Chapter 10 – Hydrogen Storage*. 2017.
- L. Baetcke and M. Kaltschmitt, *Hydrogen storage for mobile application: Technologies and their assessment*. Elsevier Ltd., 2018.
- Makridis, *Hydrogen storage and compression*, no. June. 2016.
- M. Gambini, T. Stilo, and M. Vellini, "High temperature metal hydrides for energy systems Part B: Comparison between high and low temperature metal hydride reservoirs," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 25, pp. 16203–16213, 2017.
- B. Viswanathan, "Chapter 10 – Hydrogen Storage," in *Energy Sources*, 2017, pp. 185–212.

PROFIL PENULIS

Reza Abdu Rahman, S.Pd., M.T.



Penulis dilahirkan pada tanggal 06 Juni 1990 di kota Bekasi, Jawa Barat. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN Margahayu XI Kota Bekasi, SMPN 3 Kota Bekasi dan SMK Karya Guna Bhakti I. Pada Tahun 2014, penulis menyelesaikan pendidikan S1 di Jurusan Pendidikan Teknik Mesin Universitas Negeri Jakarta. Penulis aktif di Pendidikan Vokasi mulai tahun 2013–2019 di SMKN 10 Kota Bekasi dan menjabat sebagai Kepala Program Keahlian Teknik Otomotif. Penulis melanjutkan pendidikan S2 di Magister Teknik Mesin Universitas Pancasila dan lulus pada tahun 2020. Mulai tahun 2019, penulis aktif pada bidang STEM dengan fokus pada *Engineering Program for High School*, dan menjadi Guru tamu di *HighScope* Indonesia Institute serta mulai aktif menjadi Dosen di Universitas Pancasila Sejak Tahun 2021. Fokus penelitian penulis adalah bidang penyimpanan energi dan hibridisasi sistem *renewable energy*.

Dr. Ir. Dwi Rahmalina, M.T.



Penulis dilahirkan pada tanggal 01 September 1969 di Jakarta, penulis menyelesaikan pendidikan S3 di Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia pada tahun 2012. Saat ini penulis bekerja sebagai tenaga pendidik di Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Pancasila dengan jabatan akademik Lektor Kepala. Penulis telah berhasil mempublikasikan karya-karya ilmiah di jurnal internasional bereputasi, jurnal nasional terakreditasi, serta *prosiding* seminar internasional dan nasional bersama tim peneliti Fakultas Teknik Universitas Pancasila. Luaran lain yang berhasil dicapai penulis adalah 4 (empat) paten *granted* dalam kurun waktu dari tahun 2015-2021 di bidang pengembangan material komposit untuk aplikasi material tahan peluru dan komponen otomotif. Saat ini, penulis aktif melakukan riset di bidang pengembangan rekayasa material, khususnya komposit dan material energi, serta pengembangan teknologi di bidang energi baru terbarukan.

Dr. Yani Kurniawan, S.T., M.T.



Penulis dilahirkan pada tanggal 17 Februari 1989 di Klaten, penulis mendapat gelar sarjana pada tahun 2012 dan mendapat gelar magister teknik pada tahun 2014 di Universitas Pancasila. Penulis menyelesaikan pendidikan S3 di Departemen Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada pada tahun 2021. Saat ini penulis bekerja sebagai tenaga pendidik di Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Pancasila dengan jabatan akademik Lektor. Penulis telah berhasil mempublikasikan karya-karya ilmiah di jurnal internasional bereputasi, jurnal nasional terakreditasi, serta *prosiding* seminar internasional dan nasional bersama tim peneliti Fakultas Teknik Universitas Pancasila. Saat ini, penulis aktif melakukan riset di bidang perancangan, pengembangan teknologi manufaktur, dan pengembangan teknologi di bidang energi baru terbarukan.

Dibyo Setiawan, S.Pd., M.T.



Penulis dilahirkan pada tanggal 22 April 1991 di Jakarta. Penulis menempuh pendidikan mulai tahun 1997 s.d 2018 di SDN Arjasari 2 Kabupaten Indramayu, SMP PGRI 2 Jakarta, SMKN 7 (Grafika) Jakarta, S1 Program Studi Pendidikan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta dan S2 Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Pancasila. Mulai tahun 2010 s.d saat ini penulis aktif terlibat di bidang Jasa Konsultansi Perencanaan seperti Perencanaan Sistem Mekanikal Bangunan Gedung dan Utilitas Sumber Daya Air. Penulis juga aktif terlibat di bidang Jasa Konstruksi seperti Pelaksanaan Kegiatan Konstruksi Bangunan Gedung, Pelaksanaan Pemasangan Sistem Mekanikal Bangunan Gedung antara lain Pelaksanaan Instalasi Sistem Transportasi Dalam Gedung, Pelaksanaan Instalasi Sistem Tata Udara, Pelaksanaan Instalasi Sistem Proteksi Kebakaran, Pelaksanaan Sistem Pompa Mekanik dan *Plumbing*. Penulis aktif di bidang akademik sebagai Dosen Tetap pada Program Studi S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Mpu Tantular sejak tahun 2021.

Fokus penelitian penulis adalah bidang Perancangan Konstruksi Mesin, *Hydropower Electric* dan Energi Baru Terbarukan.

Rani Anggrainy, S.Pd., M.T.



Penulis dilahirkan pada tanggal 10 Januari 1992 di Jakarta, Indonesia. Penulis menempuh pendidikan dasar di MI Al-Muawanatul Khaeriyah Jakarta, SMPN 63 Jakarta dan SMAN 19 Jakarta. Pada Tahun 2014, penulis menyelesaikan pendidikan S1 di Jurusan Pendidikan Teknik Mesin Universitas Negeri Jakarta. Penulis melanjutkan pendidikan S2 di Magister Teknik Mesin Universitas Pancasila dan lulus pada tahun 2018. Mulai Agustus tahun 2018, penulis mulai aktif menjadi Dosen di Universitas Krisnadwipayana, Bekasi, Jawa Barat. Fokus penelitian penulis adalah bidang rekayasa energi dan optimasi energi bidang otomotif.