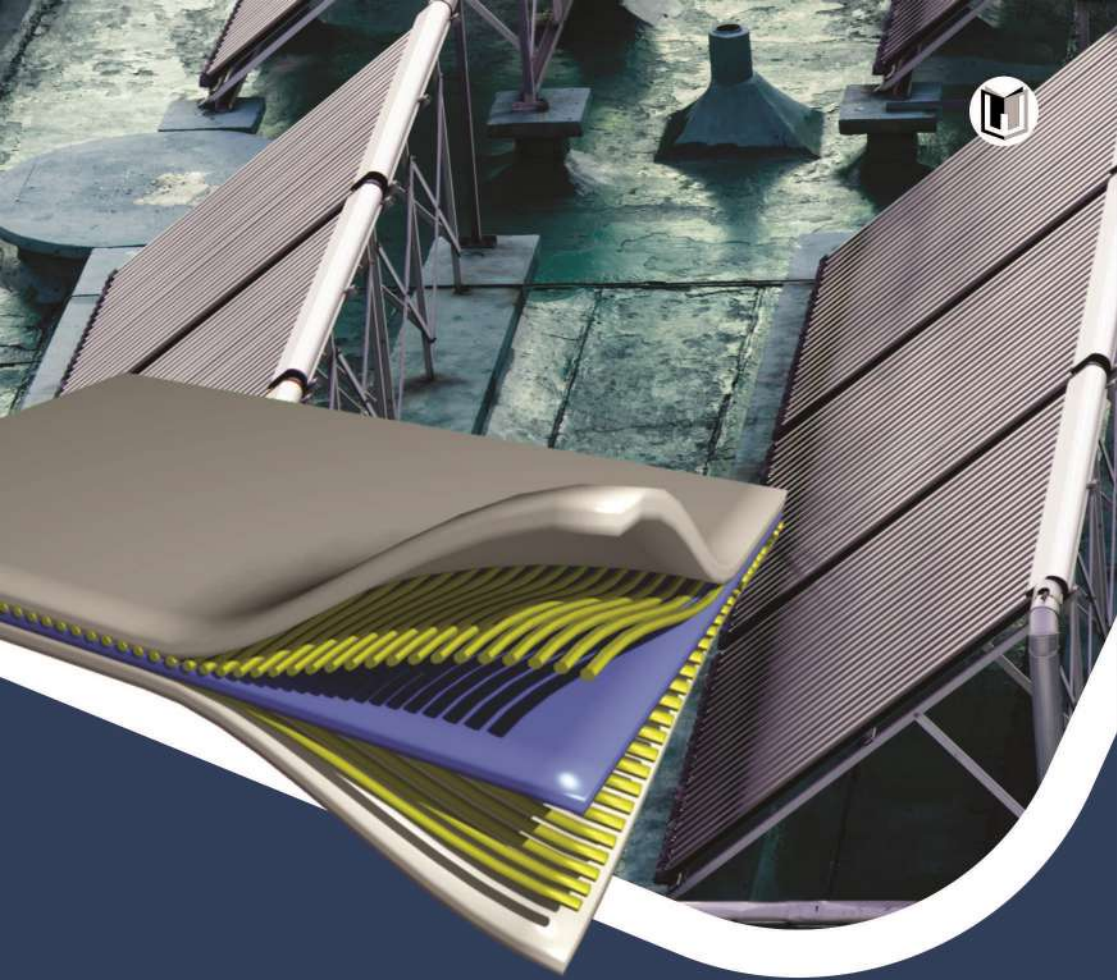




Rekayasa Material Komposit

untuk Aplikasi

Thermal Energy Storage

Dwi Rahmalina

Rekayasa Material Komposit

untuk Aplikasi

Thermal Energy Storage

Dwi Rahmalina



**REKAYASA MATERIAL KOMPOSIT
UNTUK APLIKASI *THERMAL ENERGY STORAGE***

Penulis:
Dwi Rahmalina

Desain Cover:
Usman Taufik

Tata Letak:
Handarini Rohana

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

ISBN:
978-623-459-289-4

Cetakan Pertama:
Desember, 2022

Hak Cipta 2022, Pada Penulis

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang

Copyright © 2022

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
Telpon (022) 87355370

PRAKATA

Rasa syukur yang teramat dalam dan tiada kata lain yang patut kami ucapkan selain mengucap rasa syukur. Karena berkat rahmat dan karunia Tuhan Yang Maha Esa, buku yang berjudul “Rekayasa Material Komposit Untuk Aplikasi *Thermal Energy Storage*” telah selesai di susun dan berhasil diterbitkan, Penggunaan material komposit matriks aluminium telah digunakan pada berbagai industri, dengan lebih dari 3.5 juta kilogram antara lain pada industri otomotif. Karena beratnya yang ringan sehingga dapat menghemat bahan bakar, penggunaan komposit untuk aplikasi ini dari tahun ke tahun terus meningkat cepat dengan laju pertumbuhan per tahun mencapai 6%.

Berbagai komponen otomotif dari material komposit telah dikembangkan, melalui rekayasa optimalisasi komposisi material pembentuknya, proses manufaktur serta proses perlakuan untuk meningkatkan performanya. Penambahan komposisi paduan Cu pada matriks komposit Al₃Si-Al₂O₃/SiC dapat meningkatkan sifat mekanis material komposit untuk aplikasi *disc brake*. Pengembangan material komposit untuk industri alat kesehatan juga telah dilakukan, yaitu untuk aplikasi roda kastor pada *hospital bed*. Peningkatan penguat 5-15 wt.% *carbon black* pada komposit matriks *polyurethane* dapat meningkatkan *resistivity* dari roda kastor.

Sehingga dengan penambahan serbuk grafit dapat dilakukan untuk meningkatkan performa roda kastor hasil manufaktur dengan proses *injection molding*. Untuk aplikasi energi, bilah turbin yang terbuat dari komposit canggih baru dapat dibuat lebih panjang, lebih kaku, lebih ringan, dan lebih responsif terhadap pergeseran kecepatan angin yang tiba-tiba daripada bilah yang konvensional. Penggunaan komposit *nanocarbon graphene oxide* juga telah dikembangkan sebagai komponen penyimpan energi. Pemanfaatan komposit untuk penyimpan energi termal memiliki peluang untuk dikembangkan karena potensi sumber daya yang besar untuk menjamin masa depan yang berkelanjutan, hemat energi, didukung oleh sumber daya dalam negeri.

Akan tetapi pada akhirnya kami mengakui bahwa tulisan ini terdapat beberapa kekurangan dan jauh dari kata sempurna, sebagaimana pepatah menyebutkan “tiada gading yang tidak retak” dan sejatinya kesempurnaan hanyalah milik tuhan semata. Maka dari itu, kami dengan senang hati secara terbuka untuk menerima berbagai kritik dan saran dari para pembaca sekalian, hal tersebut tentu sangat diperlukan sebagai bagian dari upaya kami untuk terus melakukan perbaikan dan penyempurnaan karya selanjutnya di masa yang akan datang.

Terakhir, ucapan terima kasih kami sampaikan kepada seluruh pihak yang telah mendukung dan turut andil dalam seluruh rangkaian proses penyusunan dan penerbitan buku ini, sehingga buku ini bisa hadir di hadapan sidang pembaca. Semoga buku ini bermanfaat bagi semua pihak

dan dapat memberikan kontribusi bagi pembangunan ilmu pengetahuan di Indonesia.

Desember, 2022

Penulis

DAFTAR ISI

PRAKATA	iii
DAFTAR ISI	vi
BAB 1 REKAYASA MATERIAL KOMPOSIT UNTUK APLIKASI	
THERMAL ENERGY STORAGE	1
BAB 2 REKAYASA MATERIAL UNTUK PENYIMPANAN ENERGI	5
A. Ragam Sistem Penyimpanan Energi	5
B. Penyimpanan Energi Melalui Rekayasa Mekanika	6
1. <i>Pumped Hydro Storage</i> (Waduk)	6
2. Udara Bertekanan (<i>Compressed Air</i>).....	7
3. <i>Flywheel</i>	8
C. Penyimpanan Energi Melalui Rekayasa Material	9
1. Baterai	9
2. <i>Thermal Storage</i>	11
3. <i>Solid State Hydrogen Storage</i>	14
D. Ringkasan Bagian II	16
BAB 3 REKAYASA MATERIAL KOMPOSIT UNTUK	
THERMAL ENERGY STORAGE	17
A. Komposit <i>Phase Change Material</i> Basis Parafin	17
B. Komposit Parafin dengan Abu Vulkanik	20
C. Komposit Parafin dengan Polimer	22
D. Komposit Magnesium/Nikel untuk Penyimpanan Panas Termokimia	28
E. Ringkasan Bagian III	30
BAB 4 PELUANG DAN TANTANGAN	33
A. Pentingnya Teknologi Penyimpanan Energi	33
B. Penerapan Teknologi Penyimpanan Energi.....	37
C. Potensi Pengembangan Material Komposit untuk <i>Thermal Energy Storage</i>	40

D. Kunci Utama untuk Pengembangan Material Komposit untuk <i>Thermal Energy Storage</i>	41
E. Tren di Masa Depan Terkait Material Komposit untuk <i>Thermal Energy Storage</i>	43
F. Ringkasan Bagian IV	45
DAFTAR PUSTAKA	47
PROFIL PENULIS	51



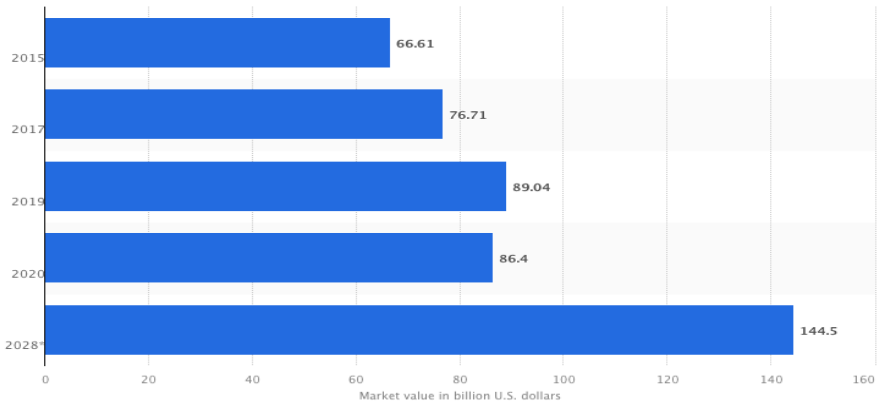
REKAYASA MATERIAL KOMPOSIT UNTUK APLIKASI *THERMAL ENERGY STORAGE*

Sejalan dengan kebijakan Pemerintah Republik Indonesia dalam mendukung mitigasi perubahan iklim dan peningkatan ekonomi hijau (*green economy*), maka transformasi energi Indonesia menuju energi baru terbarukan (EBT) terus didorong dan diperkuat. Salah satunya upaya yang dilakukan adalah dengan mengembangkan pemanfaatan material yang efisien dan ramah lingkungan, yaitu material komposit, sehingga pada akhirnya dapat mengakselerasi adopsi cara hidup energi bersih.

Topik mengenai pengembangan material komposit ini saya pilih karena sejak tahun 2013 tim riset saya bersama dengan mahasiswa dan mitra telah menekuni berbagai pengembangan material komposit. Desain material komposit direkayasa untuk berbagai aplikasi dan karakteristik kinerja yang menarik karena beratnya yang ringan serta memiliki sifat

tailorability dan fleksibel sehingga sifat mekanis yang diinginkan dapat dimodifikasi tergantung dari kombinasi matriks dan penguatnya [1]. Keunggulan ini yang menjadi dasar para periset untuk mengembangkan material komposit sebagai alternatif pengganti material konvensional. Potensi pasar global untuk material komposit diproyeksikan mencapai USD 126.3 miliar pada tahun 2026, dengan meningkatnya kebutuhan untuk energi, *aerospace* dan *defense*, otomotif dan industri transportasi [2]. Statistik menunjukkan bahwa *market value* dari penggunaan material komposit secara luas di dunia pada tahun 2015, 2017, 2019 dan 2020 serta prediksi pada tahun 2028 akan mengalami peningkatan [3], seperti tampak pada Gambar 1.1.

Penggunaan material komposit matriks aluminium telah digunakan pada berbagai industri sejak tahun 2004, dengan lebih dari 3.5 juta kilogram antara lain pada industri otomotif. Karena beratnya yang ringan sehingga dapat menghemat bahan bakar, penggunaan komposit untuk aplikasi ini dari tahun ke tahun terus meningkat cepat dengan laju pertumbuhan per tahun mencapai 6% [4]. Berbagai komponen otomotif dari material komposit telah dikembangkan, melalui rekayasa optimalisasi komposisi material pembentuknya, proses manufaktur serta proses perlakuan untuk meningkatkan performanya. Penambahan komposisi paduan Cu pada matriks komposit $\text{Al}_3\text{Si}-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ dapat meningkatkan sifat mekanis material komposit untuk aplikasi *disc brake* [5].



Gambar 1.1 *Market value* dari material composite secara luas dari tahun 2015 sampai 2028 [2]

Peningkatan kandungan penguat karbon aktif dan serbuk tempurung kelapa dalam komposit matriks aluminium dapat meningkatkan kekerasan dari komponen *brake pad* [6]. Pemberian rangkaian proses perlakuan panas juga dapat meningkatkan sifat mekanis komposit matriks Al-9Zn berpenguat alumina [7,8]. Pemanfaatan penguat dari serat alam bambu haur pada komposit matriks polimer dikembangkan untuk memperoleh peningkatan sifat mekanis untuk aplikasi bumper mobil [9],

Pengembangan material komposit untuk industri alat kesehatan juga telah dilakukan, yaitu untuk aplikasi roda kastor pada *hospital bed*. Peningkatan penguat 5-15 wt.% *carbon black* pada komposit matriks *polyurethane* dapat meningkatkan *resistivity* dari roda kastor [10]. Penambahan serbuk grafit dapat dilakukan untuk meningkatkan performa roda kastor hasil manufaktur dengan proses *injection molding* [11].

Untuk aplikasi energi, bilah turbin yang terbuat dari komposit canggih baru dapat dibuat lebih panjang, lebih kaku, lebih ringan, dan lebih responsif terhadap pergeseran kecepatan angin yang tiba-tiba daripada bilah yang konvensional [12]. Penggunaan komposit *nanocarbon graphene oxide* juga telah dikembangkan sebagai komponen penyimpan energi [13]. Pemanfaatan komposit untuk penyimpan energi termal memiliki peluang untuk dikembangkan karena potensi sumber daya yang besar untuk menjamin masa depan yang berkelanjutan, hemat energi, didukung oleh sumber daya dalam negeri.



REKAYASA MATERIAL UNTUK PENYIMPANAN ENERGI

A. RAGAM SISTEM PENYIMPANAN ENERGI

Terdapat banyak ragam sistem penyimpanan energi yang dapat dimanfaatkan untuk mendukung kebutuhan sistem energi, baik untuk keperluan *mobile* maupun skala besar. Gambar 2.1 menyajikan klasifikasi utama sistem penyimpanan energi berdasarkan dua aspek besar yakni rekayasa mekanika dan rekayasa material.

Rekayasa mekanika fokus pada kelengkapan peralatan sistem yang memanfaatkan sifat mekanis dan sangat bergantung kepada perlengkapan khusus. Sistem ini memiliki kapasitas penyimpanan yang sangat besar, namun juga membutuhkan perlengkapan yang sangat rumit. Sebaliknya, rekayasa material memungkinkan penyimpanan energi dengan melakukan

modifikasi fungsi material. Sistem ini cenderung lebih kecil, kompak dan memiliki sifat *modular* yang baik.



Gambar 2.1 Klasifikasi sistem penyimpanan energi

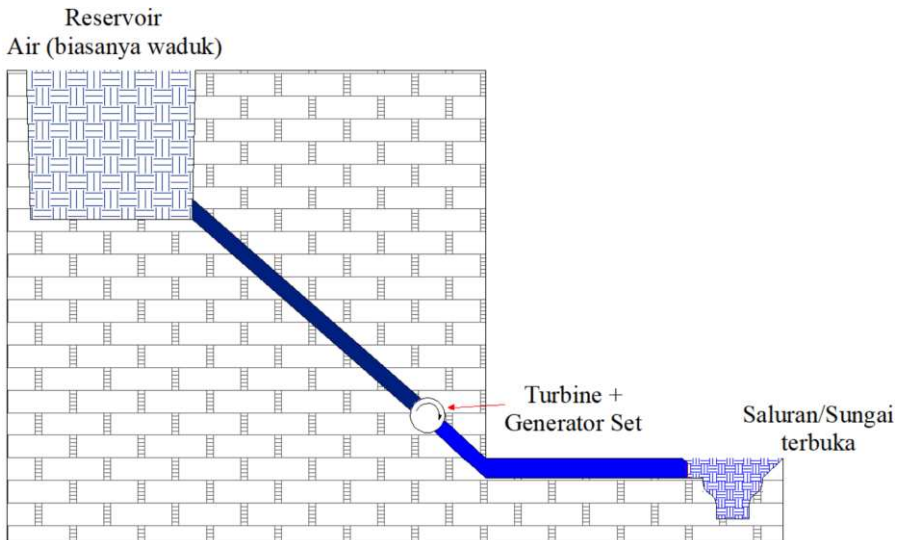
B. PENYIMPANAN ENERGI MELALUI REKAYASA MEKANIKA

1. *Pumped Hydro Storage* (Waduk)

Sistem ini secara prinsip sama dengan waduk yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga air. Air dengan ketinggian tertentu ditampung, kemudian dialirkan melalui *penstock* untuk menggerakkan turbin. Perbedaan utamanya adalah sifat alami air yang ada. Pada kasus PLTA, air yang ada diperoleh dari proses alam (hujan), sedangkan pada *pumped hydro storage* air yang ada diperoleh dari pompa. Gambar 2.2 menyajikan skematik kerja sistem *pumped hydro storage*.

Air sungai dipompa untuk dinaikkan ke waduk. Sumber listrik pompa umumnya berasal dari pembangkit tenaga matahari maupun energi angin. Model lanjutan yang dikembangkan juga menggunakan energi dari beban lebih pembangkit listrik tenaga fosil. Air yang ditampung kemudian

dialirkan balik ke sungai saat malam hari atau membutuhkan pasokan lebih. Selanjutnya, air menggerakkan turbin untuk menghasilkan listrik.

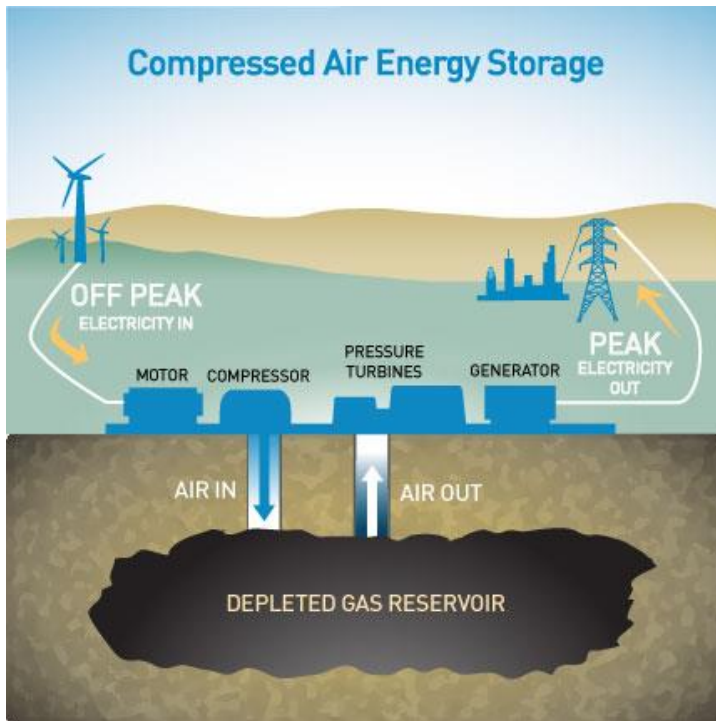


Gambar 2.2 Sistem kerja *pumped hydro storage*

2. Udara Bertekanan (*Compressed Air*)

Konsep kerja sistem ini sama dengan *pumped hydro storage*, perbedaan utamanya adalah penggunaan udara sebagai fluida kerja. Gambar 2.3 menunjukkan konsep kerja dari *compressed air energy storage*. Reservoir gas yang sudah tidak terpakai digunakan sebagai tabung penyimpanan udara bertekanan. Udara bertekanan disuplai oleh kompresor. Energi yang digunakan untuk menggerakkan kompresor diperoleh dari energi terbarukan maupun produksi berlebih dari pembangkit. Kemudian, saat terjadi beban puncak atau dibutuhkan suplai

tambahan, udara bertekanan dialirkan ke turbin untuk menggerakkan generator.

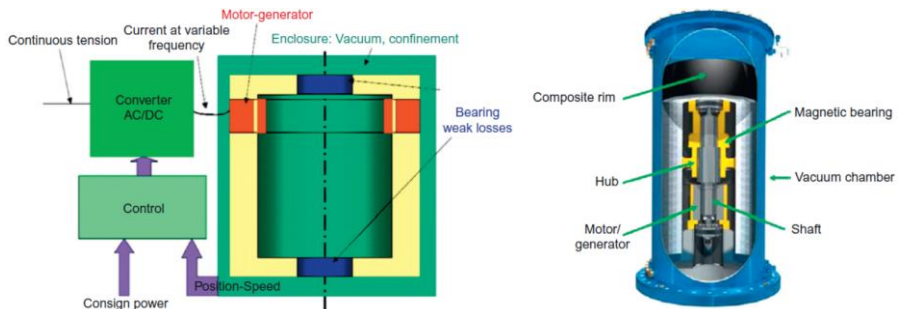


Gambar 2.3 Sistem kerja *compressed air energy storage* [14]

3. *Flywheel*

Energi berlebih yang dihasilkan dari pembangkit modular tenaga diesel dapat disimpan pada sistem *flywheel*. *Flywheel* menggunakan sifat inersia mekanis untuk menjaga momentum putar. Energi mekanis disuplai dari motor dengan sumber utamanya energi listrik berlebih dari pembangkit (Gambar 2.4). Kemudian saat dibutuhkan kembali, energi mekanis dari

flywheel digunakan untuk menggerakkan generator untuk membangkitkan listrik kembali.



Gambar 2.4 Sistem kerja *flywheel* [15]

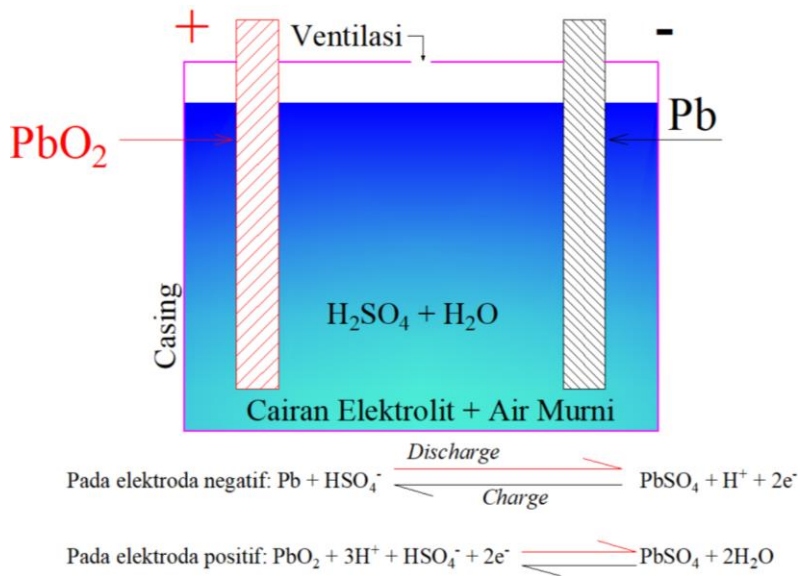
C. PENYIMPANAN ENERGI MELALUI REKAYASA MATERIAL

1. Baterai

Penyimpanan energi listrik dilakukan dengan menggunakan rekayasa material yang dapat menghasilkan aliran elektron. Sebagai contoh, *lead-acid battery* menggunakan reaksi H_2SO_4 dengan Pb (Gambar 2.5). Reaksi ini menyebabkan adanya perbedaan potensial listrik dan memungkinkan adanya aliran elektron. Rekayasa material memegang kunci penting untuk peningkatan kapasitas baterai. Beberapa upaya dilakukan dengan menggunakan jenis material yang lebih beragam dan juga penerapan teknologi komposit untuk menghasilkan baterai listrik yang lebih optimal (Tabel 2.1).

Rekayasa material yang dilakukan mampu menaikkan kapasitas penyimpanan dan perbaikan sifat operasi sistem. Penggunaan komposit juga memberikan peluang peningkatan kapasitas dan usia pakai dari

baterai, seperti penggunaan *Nickel–Iron* yang dapat mencapai usia pakai 20 tahun. Rekayasa material memegang kunci penting untuk pengembangan baterai listrik dan juga nantinya akan bermanfaat untuk penyimpanan energi termal dan hidrogen.



Gambar 2.5 Rekayasa material untuk penyimpanan energi listrik

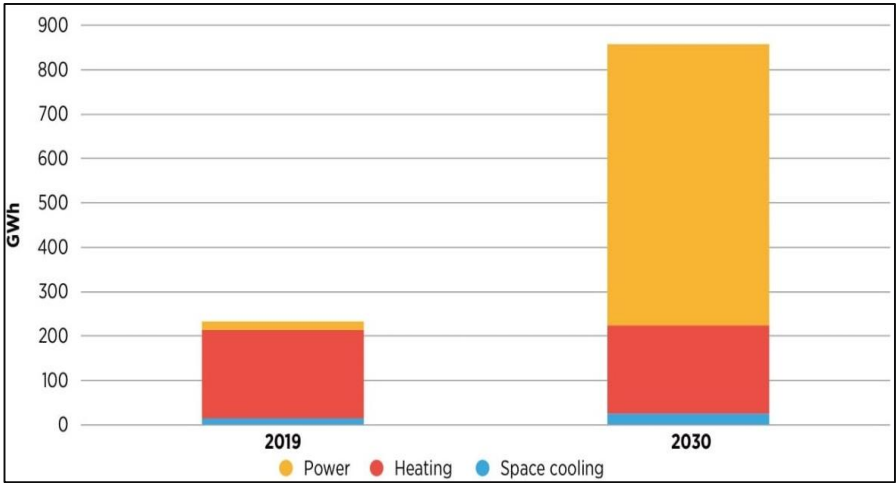
Tabel 2.1 Rekayasa material dan teknologi material komposit untuk baterai listrik [15]

	Energi Spesifik (WH/kg)	Daya Spesifik (W/kg)	Tegangan Sel (V)	Siklus	Usia (Tahun)	DOD (Maksimal)	Laju Self-Discharge	Efisiensi (%)
Lead-Acid	35–50	150–400	2.1	50–1,000	5 tahun	20–80 %	2–8%/,hingga 20–30%/bulan	75–85%
Nickel-Iron	50–60	80–150	1.5	2,000	20 tahun	80 %	20–40%/bulan	
Nickel-Cadmium	30–60	80–150	1.2	1,000–50,000	10–15 tahun	60–80 %	5–15%/bulan	60–70%

<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%

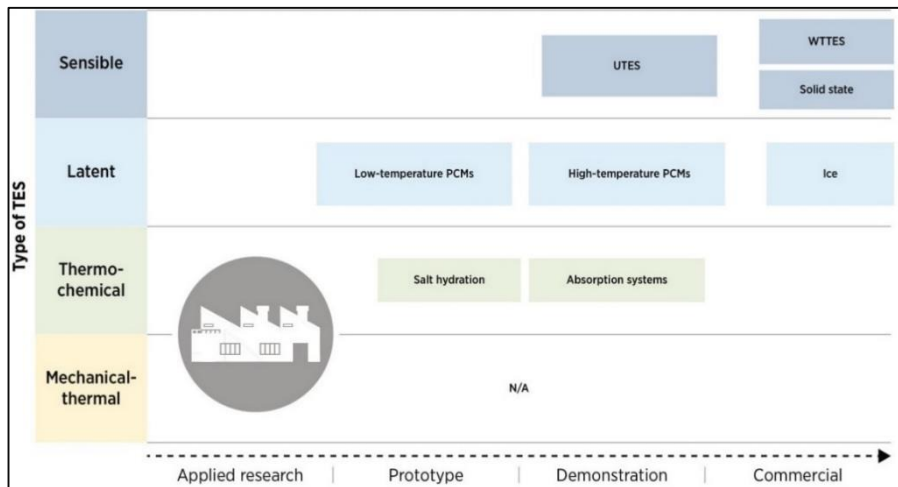
2. Thermal Storage

Alternatif penyimpanan energi dengan menggunakan rekayasa material adalah teknologi penyimpanan energi termal (*thermal energy storage*, TES). Teknologi ini fokus pada penyimpanan energi termal yang dapat digunakan untuk berbagai macam keperluan sistem energi, seperti penyediaan air panas, kebutuhan pendinginan produk dan ruangan, bahkan dapat diterapkan untuk sistem pembangkit listrik berbasis siklus termodinamika.



Gambar 2.6 Proyeksi kapasitas TES terpasang pada tahun 2030 [17]

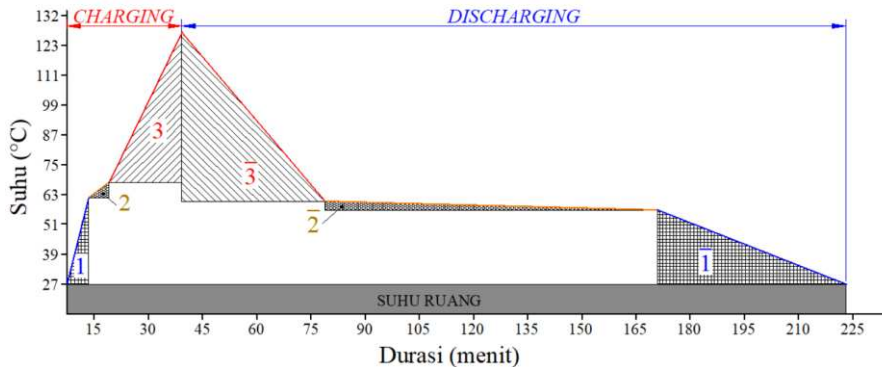
Atensi global menunjukkan tren perkembangan TES yang sangat baik dikarenakan peluang pemanfaatannya yang lebih luas, memiliki nilai ekonomis yang baik dan dapat digunakan untuk sistem bergerak (misalnya transportasi rantai pasokan dingin). Gambar 2.6 menunjukkan tren kapasitas TES global di tahun 2030.



Gambar 2.7 Progres terkini dari material TES yang dikembangkan [17]

Proyeksi yang sangat optimis tersebut didasari pada upaya berkelanjutan untuk menekan emisi karbon global dan mendukung pemanfaatan yang lebih luas dari teknologi energi baru terbarukan. Operasi dari TES sangat bergantung pada jenis material yang digunakan. Jenis TES yang dikembangkan terdiri dari material *sensible*, *phase change material* (PCM) dan *thermochemical*. Keseluruhan jenis TES tersebut dapat dimaksimalkan dengan melakukan rekayasa material komposit yang mana

dapat meningkatkan kapasitas sistem, kenaikan usia pakai dan biaya yang lebih murah.



Gambar 2.8 Rentang operasi gabungan sistem TES berbasis parafin dan abu vulkanik [18]

Gambar 2.7 menunjukkan capaian kemajuan dari tiap jenis TES yang digunakan. Terlihat jenis TES berbasis *sensible* dan *latent* (PCM) telah mencapai tahapan komersil. Hal ini merupakan satu keuntungan tersendiri dikarenakan kedua material tersebut memiliki rentang operasi yang lebih baik dan usia pakai yang lebih lama, sehingga memberikan dampak ekonomi yang positif. Peran rekayasa material menjadi kunci dari kemajuan kedua jenis material TES tersebut. Sebagai contoh, penerapan teknologi gabungan TES berbasis *sensible* dan *latent* menggunakan parafin dan polimer memungkinkan kapasitas terpasang TES menjadi lebih tinggi (Gambar 2.8).

3. Solid State Hydrogen Storage

Hidrogen merupakan bentuk energi paling bersih yang dapat digunakan untuk proses pembakaran dan pembawa energi (*energy carrier*) untuk reaksi menghasilkan listrik. Tabel 2.2 menunjukkan perbandingan sifat penting bahan bakar antara hidrogen, gas metana dan bensin. Nilai energi hidrogen paling tinggi dan dengan energi penyulutan yang sangat kecil.

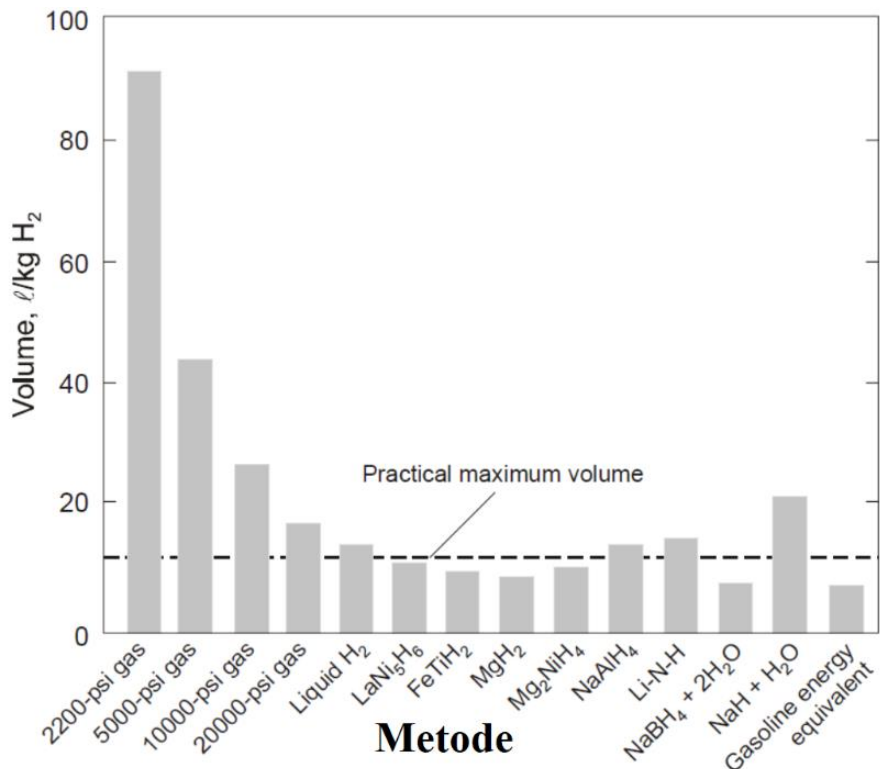
**Tabel 2.2 Perbandingan sifat hidrogen
dengan gas metana dan bensin [19]**

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 lidah api (K)	2318	2148	2473
Energi penyulutan minimal (mW)	0.02	0.29	0.24

Permasalahan utama dari hidrogen adalah densitas yang kecil dan umumnya terikat dengan unsur lain (misalnya karbon pada rantai hidrokarbon). Tantangan ini yang menjadi masalah dari penerapan hidrogen skala besar. Kemudian, hidrogen sangat sulit untuk disimpan dan umumnya hanya menggunakan penyimpanan basis mekanika melalui tangki bertekanan maupun likuifaksi pada temperatur rendah.

Penyimpanan terbaik hidrogen dilakukan dengan menggunakan *solid-state hydrogen storage*. Hal ini dapat dilihat (Gambar 2.9) bahwa kapasitas volume/kg H₂ terbaik dapat dicapai dengan menggunakan rekayasa

material. Penggunaan tangki bertekanan (rentang 2200-20000 psi) tidak cocok untuk digunakan karena berbahaya dan tidak mungkin diterapkan secara praktis. Alternatifnya adalah penggunaan material padat seperti magnesium (Mg), Lanthanum (La), Natrium (Na), dll. Rekayasa material komposit memberikan pengaruh pada kenaikan kapasitas dan rasio volume untuk penyimpanan hidrogen.



Gambar 2.9 Rekayasa material untuk pengembangan *solid-state hydrogen storage* [19]

D. RINGKASAN BAGIAN II

Penyimpanan energi berperan penting pada kehidupan modern dan juga untuk peningkatan kapasitas dan fleksibilitas dari sistem energi. Penyimpanan energi menggunakan rekayasa material memiliki kemudahan dalam penggunaannya, dapat dibuat secara modular, dengan tren biaya yang lebih ekonomis dibandingkan sistem basis mekanika. Peningkatan kualitas sistem penyimpanan energi melalui rekayasa material merupakan kunci terpenting dalam pemenuhan aspek kapasitas, durabilitas dan juga operasi sistem penyimpanan energi yang lebih optimal.



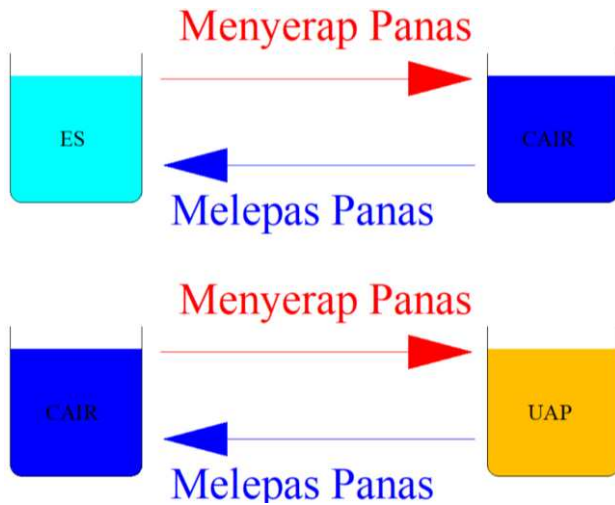
REKAYASA MATERIAL KOMPOSIT UNTUK *THERMAL ENERGY STORAGE*

A. KOMPOSIT *PHASE CHANGE MATERIAL* BASIS PARAFIN

Phase change material (PCM) memanfaatkan perubahan fasa dari material yang digunakan untuk menyerap (*charging*) dan melepas (*discharging*) energi panas. Keuntungan utama dari PCM adalah tidak ada kenaikan temperatur pada saat proses *charging* dan *discharging* sehingga proses dapat berlangsung secara isothermal. Konsep PCM disajikan pada Gambar 3.1 pada proses membeku dan mencair dari air.

Proses penyerapan panas menyebabkan air dalam fasa padat (es) berubah menjadi cair (fasa cair). Proses dapat terjadi pada suhu tetap yang berarti es pada suhu 0 °C dapat berubah menjadi air pada suhu yang sama (0 °C). Proses ini memanfaatkan sifat kalor lebur air. Pada tahapan

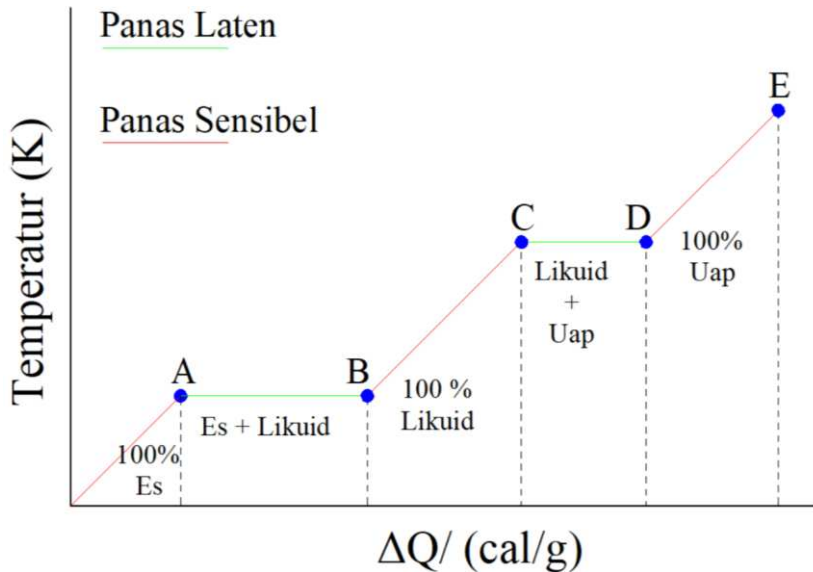
lanjut, proses perubahan dari fasa cair (air) menjadi fasa gas (uap air) dapat dilakukan juga dengan prinsip yang sama.



Gambar 3.1 Konsep dasar *phase change material* (PCM)

Penyimpanan energi panas melalui pemanfaatan PCM dapat memberikan kapasitas yang lebih besar dengan menggabungkan sifat *sensible* dan sifat laten material penyimpanan. Konsep ini dapat dilihat pada Gambar 3.2. Dari berbagai macam kandidat, PCM basis parafin (lilin) merupakan kandidat paling ideal karena memiliki kapasitas laten yang besar (± 180 kJ/kg) dan dimungkinkan untuk penggabungan sifat *sensible*. Lebih lanjut, parafin dapat menggabungkan sifat *sensible* pada fasa padat dan sifat *sensible* pada fasa cair dalam rentang suhu ruang. Secara ekonomis, kapasitas yang besar dari parafin dapat memberikan biaya per satuan energi yang lebih murah. Dan yang lebih menguntungkan lagi

adalah biaya bahan mentah parafin yang murah karena merupakan “*sisa*” atau “*limbah*” dari proses distilasi minyak bumi dan ketersediaan yang melimpah.

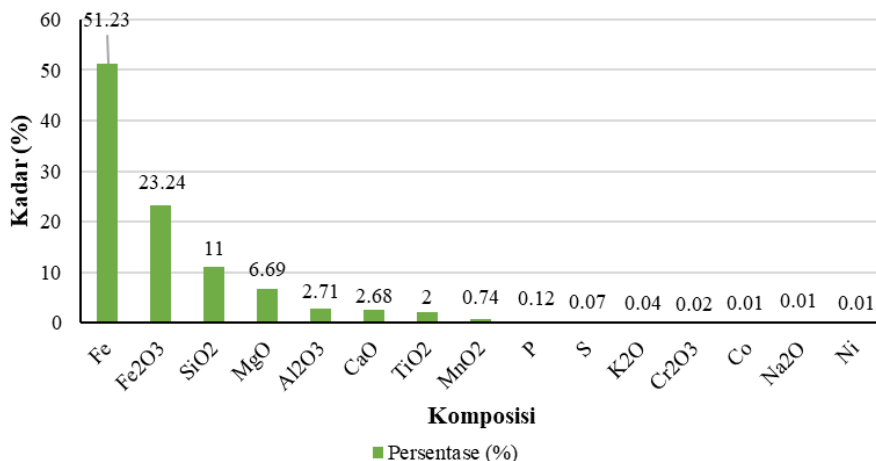


Gambar 3.2 Rentang kapasitas energi (ΔQ) yang lebih besar dengan menggabungkan sifat laten ($A \rightarrow B$, $C \rightarrow D$) dengan sifat *sensible* ($B \rightarrow C$ dan $D \rightarrow E$)

Banyaknya kelebihan pada PCM basis parafin menyebabkan upaya berkelanjutan dilakukan untuk memaksimalkan performanya pada sistem. Namun demikian, masih ada beberapa kekurangan terkait parafin yang secara khusus berkaitan dengan sistem perpindahan panas yang tidak optimal dan perubahan fasa yang tidak stabil. Guna mengatasi masalah tersebut, upaya lebih terukur dilakukan melalui proses rekayasa material komposit.

B. KOMPOSIT PARAFIN DENGAN ABU VULKANIK

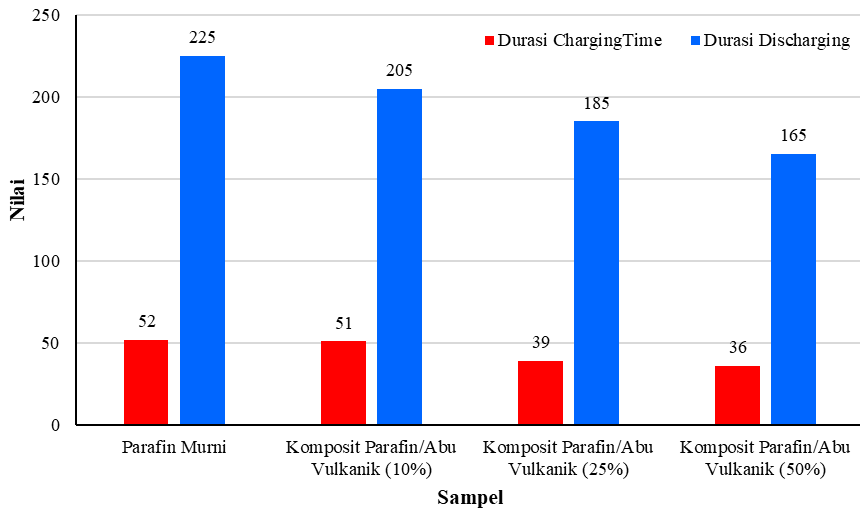
Peningkatan konduktivitas termal parafin dilakukan dengan mencampurnya menggunakan abu vulkanik. Pertimbangan terpenting dari pemilihan abu vulkanik adalah ketersediaan yang melimpah di Indonesia dan cenderung murah secara nilai ekonomi. Kandungan utama dari abu vulkanik memiliki banyak unsur logam (Gambar 3.3). Kandungan utama terdiri dari unsur besi dan besi oksida yang cenderung memiliki daya hantar yang baik.



Gambar 3.3 Kandungan unsur abu vulkanik yang digunakan pada studi [18]

Peningkatan konduktivitas termal parafin dilakukan dengan mencampurnya menggunakan abu vulkanik. Pertimbangan terpenting dari pemilihan abu vulkanik adalah ketersediaan yang melimpah di Indonesia dan cenderung murah secara nilai ekonomi. Kandungan utama dari abu vulkanik memiliki banyak unsur logam (Gambar 3.3). Unsur pendukung

utama (lebih dari 70%) terdiri dari unsur besi dan besi oksida yang cenderung memiliki daya hantar yang baik. Proses pencampuran dengan berbeda dilakukan untuk parafin. Terjadi perubahan yang signifikan akibat adanya penambahan abu vulkanik pada komposit parafin (Gambar 3.4).



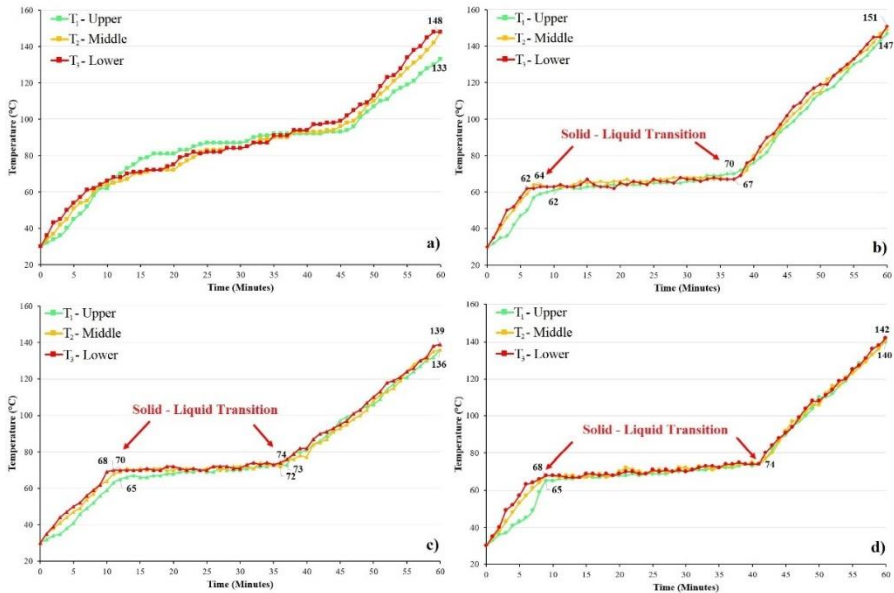
Gambar 3.4 Perbandingan waktu *charging* dan *discharging* antara parafin murni dengan komposit Kandungan unsur abu vulkanik yang digunakan pada studi [18]

Proses *charging* cenderung lebih cepat untuk sampel komposit parafin/abu vulkanik. Durasi *charging* untuk parafin murni membutuhkan waktu 52 menit, sedangkan melalui penambahan abu vulkanik dengan rasio 10%, 25% dan 50% menyebabkan penurunan laju *charging*. Dengan demikian, proses *charging* menjadi lebih cepat dan mampu menekan durasi untuk proses pengisian energi. Proses *discharging* (pelepasan energi) juga terlihat mengalami percepatan yang signifikan untuk sampel

komposit parafin/abu vulkanik. Dengan demikian, sampel komposit secara khusus menunjukkan performa yang optimal untuk memperbaiki sifat pertukaran energi pada PCM basis parafin. Detail laporan dari studi ini dapat dipelajari lebih detail pada pustaka berikut [18].

C. KOMPOSIT PARAFIN DENGAN POLIMER

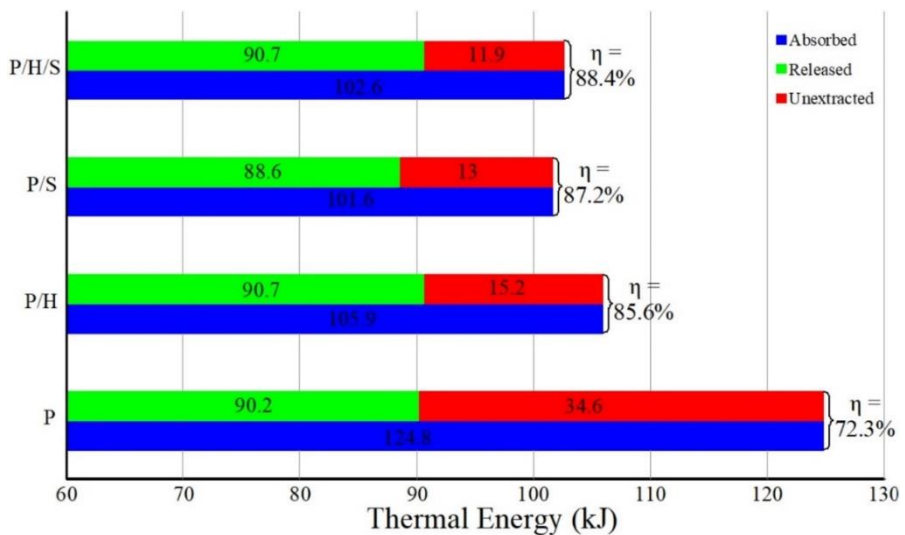
Proses pelepasan dan penyerapan panas dapat diperbaiki dengan membentuk komposit parafin/abu vulkanik. Namun, komposit ini belum mampu mengatasi masalah terkait perubahan fasa yang tidak stabil dari parafin. Metode alternatif dilakukan dengan membentuk komposit parafin/polimer untuk menghasilkan komposit *shape-stabilized phase change material* (SSPCM). Upaya ini dilakukan dengan mencampur parafin dengan polimer *high-density polyethylene* (HDPE) dan *styrene-butadiene-styrene* (SBS). Polimer ini mampu menghasilkan struktur matriks yang lebih baik saat terjadi perubahan fasa selama proses *charging* dan *discharging*. Rasio yang digunakan adalah 80% parafin dan 20% polimer.



Gambar 3.5 Perbandingan proses *charging* antara parafin dan komposit parafin/polimer (SSPCM) [20]

Perubahan fasa yang lebih stabil mampu dihasilkan oleh komposit parafin/polimer (SSPCM). Gambar 3.5 memperlihatkan bahwa parafin murni cenderung mengalami kenaikan temperatur saat terjadi proses meleleh akibat ketidakstabilan perubahan fasa. Sebaliknya, penambahan polimer untuk membentuk komposit parafin/polimer (SSPCM) dengan menggunakan HDPE, SBS dan gabungan HDPE/SBS memberikan pengaruh yang baik. Terlihat bahwa perubahan fasa (*solid-liquid transition*) terjadi dengan rentang kenaikan temperatur yang rendah. Dengan demikian, fungsi matriks dari polimer dapat menjaga distribusi termal yang baik saat perubahan fasa.

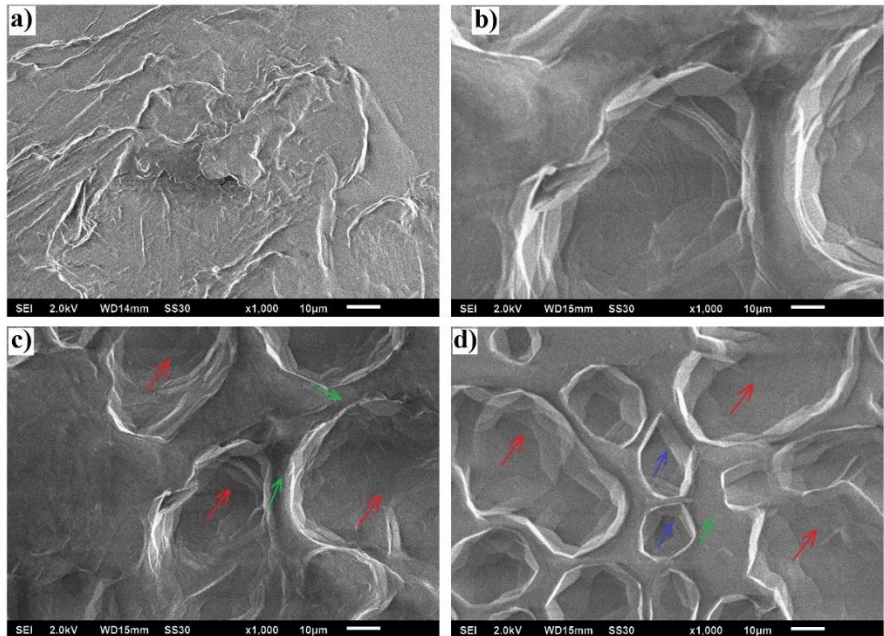
Stabilitas perubahan fasa yang baik memberikan dampak yang positif terkait dengan nilai efisiensi penyimpanan energi termal. Dari Gambar 3.6 terlihat parafin murni hanya mampu mencapai efisiensi sebesar 72.3% sedangkan komposit parafin/polimer (SSPCM) secara umum memiliki nilai efisiensi yang lebih baik dengan rerata nilai di atas 85%. Kondisi ini sangat menguntungkan untuk aplikasi sistem penyimpanan energi termal karena mampu menaikkan kapasitas penggunaan secara lebih maksimal.



Gambar 3.6 Perbandingan efisiensi parafin murni dengan komposit parafin/polimer (SSPCM) [20]

Pengamatan menggunakan *scanning electron microscope* (SEM) untuk parafin murni dan komposit parafin/polimer diperlihatkan pada Gambar 3.7. Dari pengamatan ini terlihat bahwa tidak ada pembentukan rongga antara parafin dengan polimer yang berarti parafin/polimer memiliki sifat

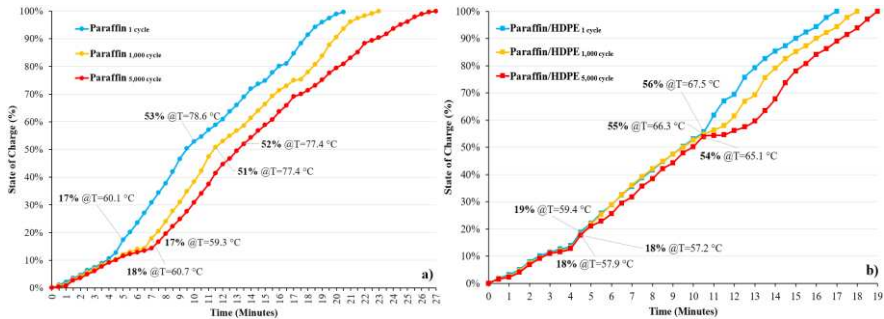
mampu basah (*wettability*) yang baik. Detail dari pembahasan ini dapat dilihat pada pustaka berikut [20].



Gambar 3.7 Pengamatan morfologi parafin murni (A), dan komposit parafin/polimer (parafin/HDPE (B), parafin/SBS (C) dan parafin/HDPE+SBS) [20]

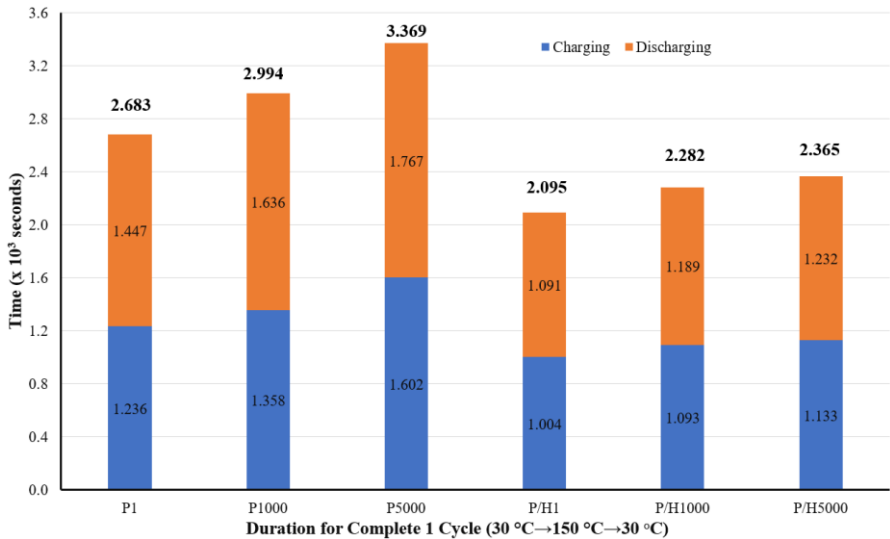
Sebagai upaya berkelanjutan untuk mendapatkan material penyimpanan energi termal yang optimal, maka asesmen usia pakai komposit parafin/HDPE dilakukan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan siklus pemanasan/pendinginan berulang hingga mencapai 5,000 siklus termal. Estimasi capaian usia 5,000 siklus adalah ≈ 13 tahun pemakaian. Hasil pengujian siklus menunjukkan penurunan performa yang

sangat tinggi dari parafin murni, sedangkan komposit parafin/HDPE memiliki performa yang lebih baik.



Gambar 3.8 Rating performa antara parafin murni (a) dengan komposit parafin/HDPE (b) setelah 5,000 siklus [21]

Komposit parafin/HDPE mampu menjaga *rating* performa yang lebih baik dibandingkan parafin (Gambar 3.8) dikarenakan memiliki stabilitas termal yang baik. Komposit parafin/HDPE mampu menjaga tingkat pengisian (*State of Charge*) yang optimal bahkan setelah 5,000 siklus. Sedangkan parafin, mengalami pelambatan pengisian akibat degradasi yang ditimbulkan karena mengalami beban termal. Dengan demikian, hal ini akan mengakibatkan perubahan durasi *charging/discharging*.

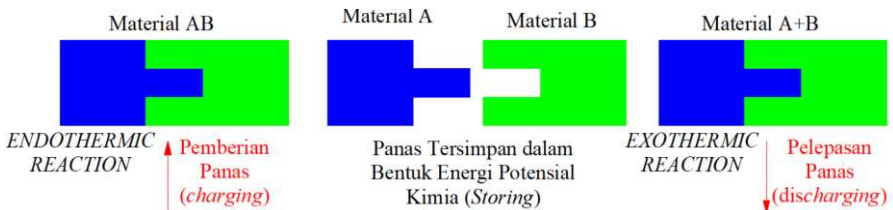


Gambar 3.9 Dampak siklus termal pada parafin dan komposit parafin/polimer [21]

Siklus yang berulang menyebabkan kerusakan dari material penyimpanan energi. Penambahan HDPE pada komposit mampu melindungi parafin dari beban termal berulang sehingga mampu menjaga durasi *charging/discharging* yang lebih baik (Gambar 3.9). Selain itu, kapasitas penyimpanan termal untuk komposit parafin/HDPE hanya mengalami penurunan sebesar 2.9% sedangkan parafin mengalami penurunan kapasitas termal hingga 8.7% setelah 5,000 siklus termal. Detail lebih lanjut dapat dipelajari pada pustaka berikut [21].

D. KOMPOSIT MAGNESIUM/NIKEL UNTUK PENYIMPANAN PANAS TERMOKIMIA

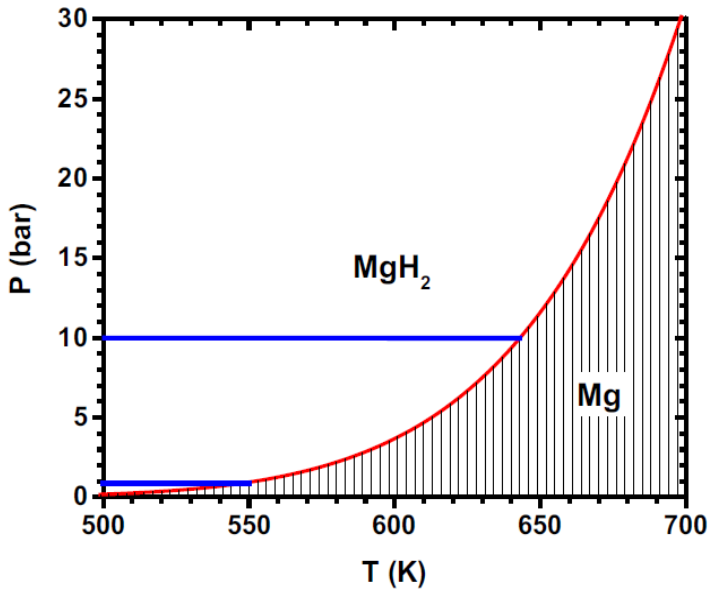
Penerapan rekayasa material *solid-state hydrogen* dapat dimanfaatkan juga untuk tujuan penyimpanan energi termal. Sifat reaksi eksotermis dan endotermis yang dibutuhkan untuk proses pemasukan dan pengisian hidrogen dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan panas. Gambar 3.10 memberikan contoh model pemanfaatan sifat termokimia untuk penyimpanan energi panas. Panas disuplai ke material AB sehingga terjadi reaksi yang menyebabkan pemisahan material A dan B. Pada posisi ini, panas disimpan dalam bentuk energi potensial antara material A dan B. Selanjutnya, ketika material A dan B bereaksi untuk membentuk material AB kembali, panas reaksi diberikan ke lingkungan.



Gambar 3.10 Penyimpanan energi panas melalui rekayasa termokimia material

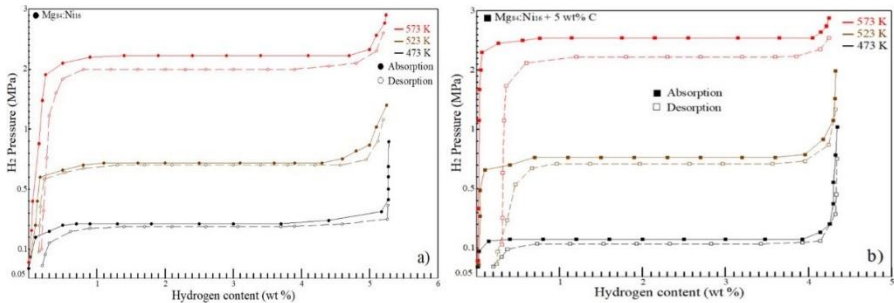
Magnesium merupakan kandidat ideal untuk penyimpanan hidrogen. Magnesium berperan sebagai material padat (A) dan hidrogen berperan sebagai material B. Hasil reaksi membentuk *magnesium hydride* (MgH_2). Dengan demikian, fungsi penyimpanan energi panas dan hidrogen dapat dicapai dengan menggunakan magnesium. Namun, sifat magnesium murni

kurang ideal karena membutuhkan tekanan dan temperatur tinggi untuk menghasilkan reaksi termokimia (Gambar 3.11).



Gambar 3.11 Hubungan tekanan hidrogen dan temperatur untuk reaksi MgH_2 [22]

Rekayasa material komposit untuk memperbaiki sifat magnesium dapat dilakukan dengan menambahkan nikel. Magnesium/Nickel dengan rasio 84:16% dapat memperbaiki sifat serapan hidrogen untuk proses reaksi (*absorption*) dan pelepasan hidrogen (*desorption*) selama proses dekomposisi. Gambar 3.12 menyajikan kurva *pressure-composition-isotherm* (PCI) untuk komposit magnesium/nikel.



Gambar 3.12 Kurva PCI komposit magnesium/nikel (a) dan magnesium/nikel dengan tambahan karbon (b) [23]

Perbaikan sifat penyerapan hidrogen pada komposit magnesium/nikel dapat memperbaiki sifat termodinamik sistem. Kapasitas penyimpanan sebesar 5 wt% dapat dicapai dengan temperatur relatif rendah (antara 473-573K) dengan tekanan kerja relatif lebih baik dibandingkan dengan magnesium murni. Selanjutnya, penambahan karbon sebanyak 5 wt% mampu mempercepat laju reaksi karena adanya kenaikan konduktivitas termal pada komposit magnesium/nikel. Detail lebih lanjut dapat dipelajari pada pustaka berikut [10].

E. RINGKASAN BAGIAN III

Rekayasa komposit dapat memperbaiki sifat material dasar untuk tujuan penyimpanan energi. Pada beberapa contoh yang disajikan, terlihat sifat material dasar yang kurang menguntungkan dikarenakan adanya beberapa kendala untuk penerapan di aplikasinya. Seperti sifat perubahan fasa yang tidak stabil dan konduktivitas termal yang rendah untuk parafin,

dan sifat termodinamika reaksi yang kurang baik dari magnesium murni. Rekayasa material komposit menggunakan abu vulkanik mampu mempercepat proses perpindahan panas pada PCM basis parafin. Penambahan polimer untuk membentuk komposit SSPCM mampu menghasilkan perubahan fasa yang lebih stabil dan meningkatkan efisiensi yang lebih baik. Lebih lanjut, usia pakai yang lebih lama dengan penurunan performa minor dapat dicapai juga oleh komposit SSPCM. Perbaikan sifat magnesium untuk penyimpanan termokimia dilakukan dengan membentuk komposit magnesium/nikel dan mampu memberikan sifat termodinamika yang lebih baik.



PELUANG DAN TANTANGAN

A. PENTINGNYA TEKNOLOGI PENYIMPANAN ENERGI

Hukum termodinamika pertama dengan jelas mengunci konsep kekekalan energi, namun tetap memberikan fleksibilitas dalam proses konversi energi. Konsep ini menunjukkan peluang untuk penyimpanan energi melalui rekayasa proses konversi energi. Dengan demikian, energi dimungkinkan untuk disimpan dan digunakan ketika diperlukan. Pada aspek teknologi, penyimpanan energi memberikan manfaat yang sangat penting untuk menunjang kehidupan manusia, khususnya pada era modern sekarang. Manfaat penyimpanan energi secara umum adalah:

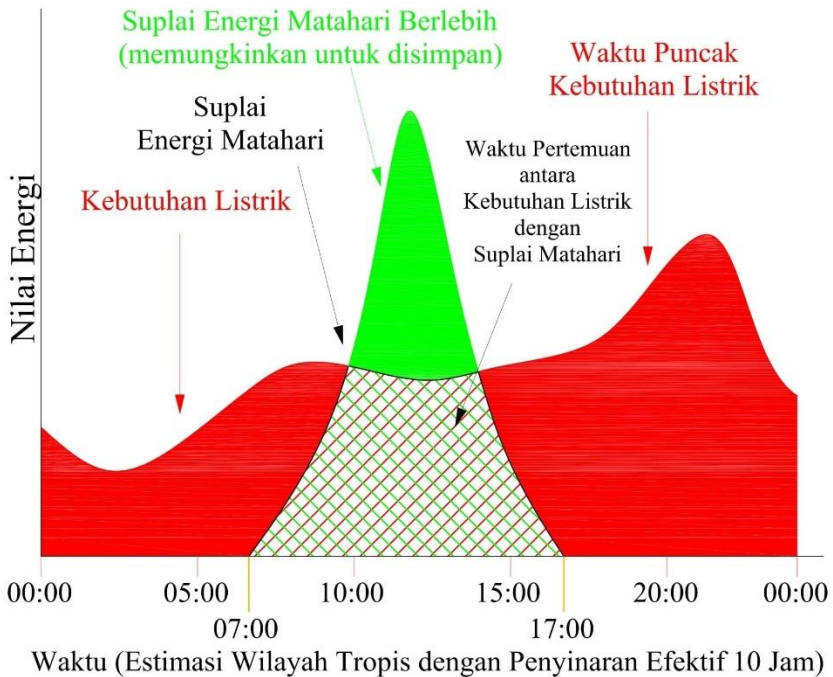
a) Meningkatkan efisiensi sistem energi

Batasan konversi energi menyebabkan sistem energi tidak mungkin mencapai efisiensi 100%. Penerapan sistem penyimpanan energi mampu meningkatkan efisiensi sistem untuk menghadapi fluktuasi perubahan

kebutuhan energi. Contoh sederhana adalah kelebihan pembangkitan listrik dari *power plant* pada siang hari dapat dimanfaatkan kembali untuk penggunaan saat beban puncak dengan penggunaan sistem penyimpanan energi. *Flywheel* mampu menjaga kinerja mesin pembakaran dengan menyimpan sebagai energi mekanis yang dihasilkan saat proses pembakaran untuk digunakan kembali pada langkah mekanis yang membutuhkan energi masukan.

b) Menjamin suplai kontinu untuk sistem konversi energi

Aspek terpenting dari teknologi energi baru terbarukan adalah jaminan suplai kontinu sistem. Gambar 4.1 menunjukkan ketidakseimbangan antara suplai matahari (sebagai sumber energi baru terbarukan) dengan keperluan energi saat siang dan malam hari. Suplai berlebih pada saat siang hari dapat disimpan melalui penyimpanan energi. Energi yang disimpan ini kemudian digunakan untuk beban listrik saat malam hari. Sehingga, suplai kontinu dari sistem energi baru terbarukan tenaga matahari dapat memberikan jaminan suplai secara kontinu, meskipun saat matahari tidak bersinar (malam hari).



Gambar 4.1 Skema suplai energi matahari dan permintaan kebutuhan listrik berdasarkan waktu [16]

c) Meningkatkan kehandalan sistem

Kehandalan sistem energi sangat penting karena menjamin keberlangsungan proses penggunaan energi. Sistem yang handal cenderung aman dari fluktuasi energi, memiliki cadangan sumber energi untuk kasus adanya gangguan pada suplai energi masukan utama, dan memungkinkan sistem energi untuk bekerja secara mandiri (*stand-alone*). Gambar 4.2 menyajikan contoh pemanfaatan penyimpanan energi termal untuk keperluan pengeringan yang didukung oleh penyimpanan energi

listrik untuk keperluan pemompaan dan perpindahan panas pada aplikasi pertanian di wilayah yang tidak terhubung jaringan listrik utama (*main grid*).



Gambar 4.2 Pemanfaatan penyimpanan energi listrik dan termal untuk pertanian pada wilayah *remote* [24]

d) Memungkinkan sistem energi untuk digunakan secara *mobile*

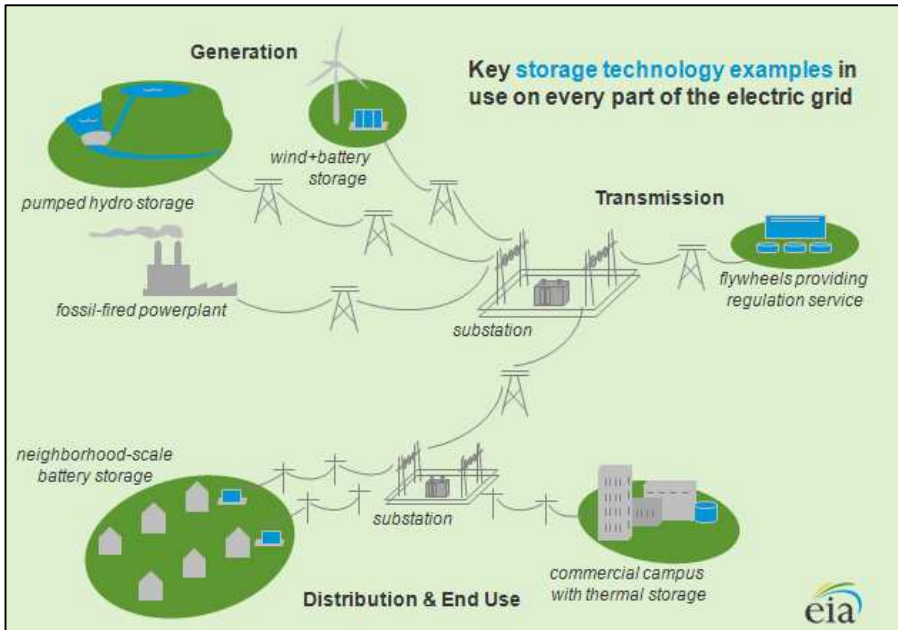
Pemanfaatan penyimpanan energi memberikan dukungan untuk keperluan sistem energi yang bergerak. Contoh paling sederhana adalah mobil listrik yang menggunakan baterai berkapasitas besar untuk mendukung operasional mesin listrik dan memungkinkan kendaraan untuk bergerak secara nirkabel. Hampir seluruh *mobile* gawai elektronik juga

menerapkan teknologi penyimpanan energi yang secara umum menerapkan penyimpanan energi listrik melalui baterai.

B. PENERAPAN TEKNOLOGI PENYIMPANAN ENERGI

Peran yang besar dari sistem penyimpanan energi mendorong perluasan manfaat pada kebutuhan energi yang lebih luas. Beberapa contoh manfaat yang telah disajikan fokus pada aspek sistem energi mikro, lalu bagaimana jika konsep ini diperbesar kapasitasnya? Misalnya untuk menjamin suplai listrik sebesar 1 GW yang bersumber dari energi baru terbarukan dengan jaminan suplai kontinue seperti pembangkit listrik tenaga fosil? Atau bagaimana integrasi sistem energi baru terbarukan dengan pembangkit listrik tenaga konvensional untuk meningkatkan kehandalan sistem yang lebih baik? Maka, sistem penyimpanan energi menjadi lebih luas dan kompleks.

Sebagai contoh paling mudah, Gambar 4.3 menyajikan model integrasi beberapa sumber energi baru terbarukan (tenaga bayu dan solar panel), beberapa metode teknologi penyimpanan energi (waduk, baterai, *flywheel*) dan pembangkit listrik konvensional tenaga bahan bakar fosil. Sistem yang ditawarkan ini mampu memberikan kenaikan efisiensi pembangkit konvensional secara signifikan, memberikan kehandalan sistem energi baru terbarukan yang lebih baik dan pada akhirnya menekan emisi karbon tanpa menyebabkan kenaikan dan fluktuasi suplai listrik yang signifikan.

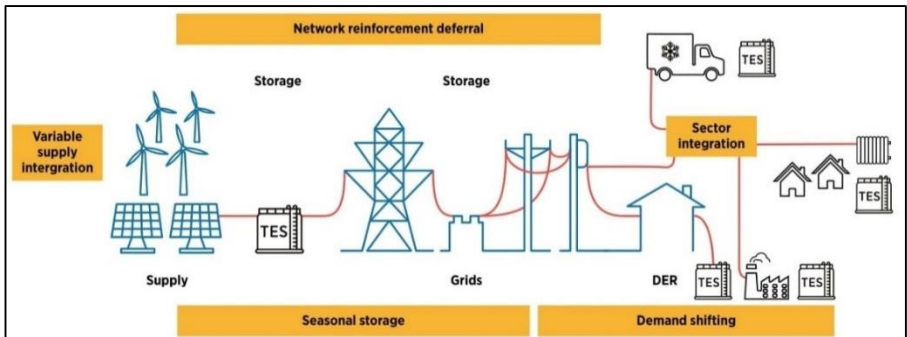


Gambar 4.3 Model sistem penyimpanan energi terintegrasi [25]

Distribusi jaringan listrik menggunakan beberapa metode penyimpanan dan pembangkit sangat kompleks dan membutuhkan perhitungan yang sangat presisi. Namun, sistem integrasi ini memberikan dampak yang sangat positif guna menaikkan kehandalan sistem energi baru terbarukan dan menaikkan efisiensi produksi pembangkit listrik konvensional.

Gambar 4.3. fokus pada pembangkitan listrik untuk sektor utama yang tidak bergerak. Lantas, bagaimana dengan sektor yang bersifat bergerak seperti transportasi? Model tambahan dapat dikembangkan dengan menggunakan *thermal energy storage*. Energi termal, baik panas ($\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)

maupun dingin ($\sim -20\text{ }^{\circ}\text{C}$) dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan sektor perumahan dan juga transportasi. Energi termal dalam bentuk energi dingin dapat digunakan untuk menjamin rantai pasokan dingin pada sistem transportasi (Gambar 4.4).

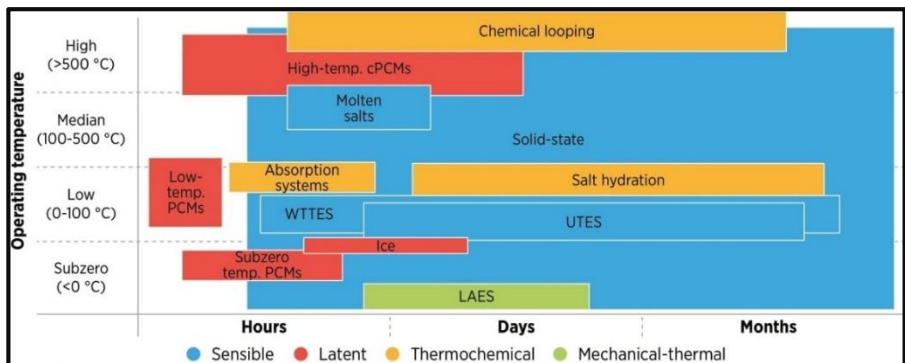


Gambar 4.4 Penerapan *thermal energy storage* untuk aplikasi perumahan dan sektor transportasi [17]

Dengan demikian, kebutuhan energi untuk pendinginan pada jaringan distribusi dapat digantikan dengan energi baru terbarukan. Kembali, kompleksitas yang tinggi menuntut adanya perhitungan yang presisi dari integrasi sistem ini. Namun, manfaat yang lebih besar dapat dihasilkan dari penerapan sistem penyimpanan energi untuk menunjang kebutuhan energi melalui pemanfaatan energi baru terbarukan.

C. POTENSI PENGEMBANGAN MATERIAL KOMPOSIT UNTUK *THERMAL ENERGY STORAGE*

Thermal energy storage (TES) mendapatkan perhatian yang sangat luas untuk terus ditingkatkan performanya. Hal ini didasari pada aspek kebutuhan akan energi bersih yang semakin tinggi, upaya pelestarian lingkungan melalui penggunaan material penyimpanan energi yang lebih ramah lingkungan dan aspek ekonomis yang lebih baik agar sistem energi baru terbarukan lebih terjangkau. TES memberikan fleksibilitas operasi sistem energi yang lebih baik dan memungkinkan untuk digunakan sebagai substitusi energi termal bahan bakar fosil.



Gambar 4.5 Suhu kerja dan durasi penyimpanan beberapa material untuk *thermal energy storage* [17]

Tren perkembangan TES didasari pada pilihan suhu kerja sistem dan juga target durasi penyimpanan (Gambar 4.5). Terlihat bahwa untuk operasi dengan suhu tinggi (> 500 °C), *composite phase change materials* (cPCMs) dan *chemical looping* memiliki peluang untuk dikembangkan lebih

lanjut. Potensi pengembangan material komposit untuk kedua model tersebut bertujuan untuk memberikan ketahanan material yang lebih baik dan daya operasi yang lebih luas. Komposit untuk cPCMs maupun *chemical looping* akan menghasilkan sistem yang lebih dapat diandalkan dan memiliki kemampuan operasi yang lebih mudah.

Untuk operasi suhu di bawah 100 °C, PCM suhu rendah (*low-temp* PCM) dan *salt hydration* berpotensi untuk dikembangkan lebih jauh. Beberapa masalah yang terjadi pada PCM jenis ini dapat disiasati dengan pengembangan komposit yang secara khusus bertujuan untuk menjamin perubahan fasa yang stabil. Pada sistem yang menggunakan *salt hydration*, peluang pengembangan dapat difokuskan untuk menjamin siklus kontinu dari proses *hydration* dan *dehydration*. Dengan mendapatkan model siklus yang kontinu melalui rekayasa komposit untuk sistem *salt hydration*, maka

D. KUNCI UTAMA UNTUK PENGEMBANGAN MATERIAL KOMPOSIT UNTUK *THERMAL ENERGY STORAGE*

Pengembangan material komposit untuk *thermal energy storage* dapat mengatasi berbagai kekurangan dari material penyimpanan energi utama. Dalam pengembangan ini, kunci utama yang harus diperhatikan meliputi aspek:

1. Durasi penyimpanan: sifat kuantitatif untuk menyatakan berapa lama dari teknologi dan material yang dikembangkan dapat menyimpan energi. Nilai kuantitatif ini dapat bersifat pada skala beberapa jam

(untuk fluktuasi permintaan energi) maupun berbulan-bulan (untuk aspek antar musim).

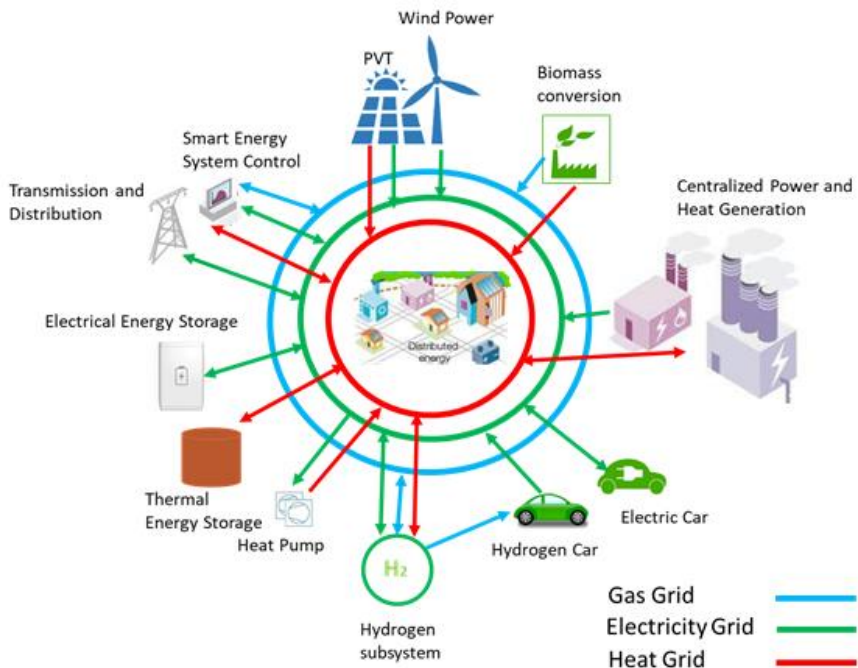
2. Potensi *vector* energi: fokus pada bentuk energi *input* dan *output* utama dari sistem penyimpanan energi yang dikembangkan.
3. Kapasitas: nilai kuantitatif untuk menyatakan banyaknya kapasitas energi yang tersimpan saat sistem sudah terisi penuh (100%). Nilai ini dapat dipertimbangkan berdasarkan kerapatan nilai energi terhadap volume (*volumetric*, MJ/m³) maupun kerapatan energi terhadap massa (*gravimetric*, MJ/kg).
4. Daya: berapa banyak energi yang dapat dilepaskan per satuan waktu oleh material penyimpanan dan teknologi yang digunakan.
5. Suhu kerja: *thermal energy storage* bekerja pada batasan suhu operasi tertentu (hukum termodinamika ke Nol). Tinggi dan rendahnya suhu operasi bergantung pada tujuan utama penyimpanan. Penyimpanan dengan tujuan panas (> 100 °C) menghendaki suhu pada material setinggi mungkin sedangkan penyimpanan dengan tujuan dingin (< 10 °C) menghendaki suhu serendah mungkin.
6. Usia pakai (*lifetime*): aspek terpenting dari pengembangan material untuk penyimpanan energi yang berkaitan dengan berapa lama usia pakai material (baik dalam notasi banyaknya siklus maupun notasi waktu dalam satuan tahun) dapat bekerja dengan maksimal sebelum mengalami degradasi performa.

E. TREN DI MASA DEPAN TERKAIT MATERIAL KOMPOSIT UNTUK *THERMAL ENERGY STORAGE*

Pengembangan berkelanjutan dari material komposit untuk aplikasi *thermal energy storage* menunjukkan tren yang cukup menjanjikan pada masa mendatang. Tren ini dapat dilihat pada sektor:

1. Sektor Pembangkit

- Fokus pada distribusi beban pembangkit dengan sumber energi baru terbarukan dapat meminimalisir fluktuasi dari beban pembangkit utama dan menaikkan kehandalan sistem energi baru terbarukan (hibridisasi, Gambar 4.6)



Gambar 4.6 Konsep *hybridization* sistem energi [26]

- b. Teknologi modular untuk *thermal energy storage* memiliki peran penting untuk menghadapi fluktuasi beban dan memungkinkan model ekonomi yang lebih baik untuk meningkatkan nilai keekonomian energi
- c. Penggunaan *thermal energy storage* untuk kebutuhan pemanasan/pendinginan mampu menurunkan beban utama pembangkit dan sistem energi baru terbarukan, sehingga memberikan substitusi energi yang baik pada sistem utama.

2. Sektor Industri

- a. Kebutuhan energi utama pada industri adalah energi panas, sehingga peluang substitusi energi dapat memberikan langkah dekarbonasi yang tepat pada sektor industri
- b. Penyediaan panas dari proses industri yang membutuhkan energi panas dengan suhu $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ dapat digantikan sepenuhnya dengan *concentrated solar power* yang digabungkan dengan *thermal energy storage*
- c. Rantai pasok dingin (*cold supply chain*) menunjukkan tren peningkatan yang tinggi yang mana mengharuskan ada sistem elektrifikasi pendinginan $>$ penggunaan *thermal energy storage* temperatur rendah dapat meminimalisir penggunaan energi untuk sistem pendingin.

F. RINGKASAN BAGIAN IV

Sistem *thermal energy storage* mengumpulkan panas matahari untuk kemudian digunakan pada berbagai macam proses industri dan aplikasi alternatif lainnya untuk masyarakat. Dukungan teknologi sangat penting untuk memaksimalkan fungsi dari *solar thermal system*. Model *parabolic dish* yang dikembangkan dapat mengumpulkan energi matahari hingga mencapai suhu lebih dari 500 °C. Penyesuaian dilakukan untuk memaksimalkan titik fokus parabola agar serapan energi panas dapat lebih maksimal. Model yang sudah dikembangkan memiliki bentuk serapan cahaya matahari yang ideal dan mampu mencapai target lebih dari 500 °C. Detail laporan studi ini dapat dilihat pada pustaka berikut [27].

Energi panas yang dikumpulkan dari *parabolic dish* kemudian ditampung pada unit penyimpanan *thermal energy storage*. Sebagai bentuk pemanfaatan teknologi yang mendukung *diversity energy* bagi masyarakat, dua model aplikasi telah berhasil dikembangkan. Model aplikasi pertama yang dikembangkan adalah desalinasi air laut. Aplikasi ini dapat menghasilkan air tawar melalui proses penguapan air laut dengan operasi kerja yang dapat berlangsung lebih lama dengan bantuan dari *thermal energy storage* [28]. Pemanfaatan berikutnya ditujukan untuk aplikasi pertanian. Model pengeringan tertutup yang memanfaatkan panas matahari dikembangkan untuk memaksimalkan proses pengeringan dan menjaga kualitas dari hasil pertanian. Alat pengering cabai yang dikembangkan dapat digabungkan dengan unit *thermal energy storage*

sehingga memiliki rentang operasi waktu yang lebih panjang dan meminimalisir kebutuhan energi dari sumber bahan bakar fosil [29].

Secara keseluruhan, pengembangan berkelanjutan dari material komposit untuk aplikasi *thermal energy storage* menunjukkan tren yang menjanjikan pada masa mendatang, baik dalam sektor pembangkit maupun untuk sektor industri. Sebagai penutup dapat disampaikan bahwa pengembangan material komposit untuk *thermal energy storage* memiliki potensi dapat mengatasi berbagai kekurangan dari material penyimpanan energi utama.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] _____, *ASM Handbook*, 21: Composites. ASM International, The Materials Information Company, 1992.
- [2] <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/composite-market-200051282.html>, diakses pada 1 September 2022
- [3] Lucia Fernandez, *Global Composite Market Value 2015-2018*, Statista, Mar 2022
- [4] Global Industry Analysis 2016, *Metal Matrix Composites (MMC) Market for Ground Transportation, Electronics/Thermal Management, Aerospace and Other End-users* - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast, 2013-2019
- [5] D. Rahmalina, H. Sukma, N. Kamanda and M. L. Aldiansyah, *The Effect of Copper Content on Mechanical Properties of Al3Si-Al2O3/SiC Hybrid Composite*, IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, Vol. 508 (2019), 012074
- [6] YP Tarsono, D. Rahmalina, *Pengaruh Karbon Aktif Dan Serbuk Tempurung Kelapa Matrik Aluminum Terhadap Kekerasan Brake Pad Komposit*, Teknobiz, Vol. 11, No. 2, pp. 94-101, Juli 2021
- [7] D. Rahmalina, B.T. Sofyan, N. Askarningsih, S. Rizkyardiani, *Effect of Treatment Process on Hardness of Al7Si-Mg-Zn Matrix Composite Reinforced with Silicon Carbide Particulate*, Advanced Materials Research Journal, Vol. 875-877 (2014), pp. 1511-1515
- [8] D. Rahmalina, H. Sukma, I.G. E. Lesmana, A. Halim, *Effect of Solution Treatment Process on Hardness of Alumina Reinforced Al-9Zn Composite Produced by Squeeze Casting*, International Journal on Smart Material and Mechatronics, Vol 1 No.1 (2014), pp. 25-28

- [9] D. Rahmalina, J. Irwanto, H. Sukma, I.C. Setiawan, A. Suhadi, *Effect of 5-15% Carbon Black Reinforcement on Mechanical Properties and Resistivity of Polyurethane Composites*, IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, Vol. 547 (2019), 012057
- [10] M Muzaini, AP Mustika, D. Rahmalina, Susanto, *Proses Manufaktur Castors untuk Kebutuhan Hospital Equipment dengan Penambahan Bubuk Grafit*, Jurnal Teknologika, Vol 10, No. 1, 01 May 2020.
- [11] Raliannoor, D. Rahmalina, *Pengaruh Fraksi Volume Penguat 2, 2,5 dan 3 % Serat Bambu Haur dan Fiberglass terhadap Kekuatan Tarik Matriks Poliester*, Jurnal INFO TEKNIK, ISSN Online 2459-9964, Vol 20, No. 2, pp. 141-154, Desember 2019
- [12] V. K.K. Upadhyayula, V. Gadhamshetty, D. Athanassiadis, M. Tysklind, F. Meng, Q. Pan, J. M. Cullen, and D. M.M. Yacout, *Wind Turbine Blades Using Recycled Carbon Fibers: An Environmental Assessment*, Environ. Sci. Technol. 2022, 56,2, pp. 1267-1277
- [13] H. Agustian, B. M. Suyitno, D. Rahmalina, *Pengembangan Baterai Tipe Voldrant dengan Pemanfaatan Material Komposit Nanokarbon Graphene Oxide pada Aplikasi Penyimpan Energi (Studi Komparasi dengan Aki Konvensional Tipe Kering)*, Jurnal Kajian Teknik Mesin Vol 4, No. 1(2019)
- [14] İbrahim Dinçer and Marc. A. Rosen, *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*, vol. Second. 2011.
- [15] S. Kalaiselvam, R. Parameshwaran, S. Kalaiselvam, and R. Parameshwaran, "Chapter 2 – Energy Storage," in *Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability*, 2014, pp. 21–56.
- [16] R. A. Rahman, D. Rahmalina, Y. Kurniawan, D. Setiawan, and R. Anggrainy, *Energy storage system*, vol. 147–149. 2021.
- [17] IRENA, *Innovation Outlook: Thermal Energy Storage*. 2020.

- [18] D. Rahmalina, D. C. Adhitya, R. A. Rahman, and I. Ismail, "Improvement the Performance of Composite Pcm Paraffin-Based Incorporate with Volcanic Ash As Heat Storage for Low-Temperature," EUREKA: Physics and Engineering, no. 1, pp. 3–11, 2022.
- [19] B. Viswanathan, "Chapter 10 – Hydrogen Storage," Energy Sources, pp. 185–212, 2017.
- [20] D. Rahmalina, R. A. Rahman, and Ismail, "Improving the phase transition characteristic and latent heat storage efficiency by forming polymer-based shape-stabilized PCM for active latent storage system," Case Studies in Thermal Engineering, vol. 31, no. March 2022, p. 101840, 2022.
- [21] D. Rahmalina, R. A. Rahman, and Ismail, "Increasing the rating performance of paraffin up to 5000 cycles for active latent heat storage by adding high-density polyethylene to form shape-stabilized phase change material," Journal of Energy Storage, vol. 46, no. December 2021, p. 103762, 2022.
- [22] J. C. Crivello et al., "Mg-based compounds for hydrogen and energy storage," Applied Physics A: Materials Science and Processing, vol. 122, no. 2, pp. 1–17, 2016.
- [23] 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," International Journal of Hydrogen Energy, 2020.
- [24] Y. Mohana, R. Mohanapriya, T. Anukiruthika, K. S. Yoha, J. A. Moses, and C. Anandharamakrishnan, "Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances," Solar Energy, vol. 208, no. February, pp. 321–344, 2020.

- [25] U. S. Energy Information Administration, "Electricity storage : Location , location , location ... and cost." pp. 5–7, 2012.
- [26] E. W. Schaefer, G. Hoogsteen, J. L. Hurink, and R. P. van Leeuwen, "Sizing of hybrid energy storage through analysis of load profile characteristics: A household case study," *Journal of Energy Storage*, vol. 52, no. PA, p. 104768, 2022.
- [27] D. Rahmalina, R.A. Rahman, O. Yudhistira, A. Suwandi, Improving The Design of Parabolic Dish Engine by Adjusting the Focal Point for Indirect Illumination Receiver, *International Journal of Applied Engineering Research (Netherlands)*. 5 (2021) 21–25.
- [28] D. Rahmalina, E.A. Pane, R.C. Herdyana, D.P.D. Putra, R.A. Rahman, Rancang Bangun Alat Desalinasi Air Laut Skala Lab Tipe Multi Stage Flash, *Otopro*. 17 (2022) 48–56. <https://doi.org/10.26740/otopro.v17n2.p48-56>.
- [29] D. Rahmalina, A. Suwandi, D.H. Edi, R. Martonggo, Rancang Bangun Alat Pengering Cabai Skala Laboratorium dengan, *Jurnal Asimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa Dan Inovasi*. 4 (2022) 105–116.

PROFIL PENULIS

Dwi Rahmalina



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 dosen tetap di Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Pancasila dengan jabatan akademik Guru Besar. 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.

Penggunaan material komposit matriks aluminium telah digunakan pada berbagai industri, dengan lebih dari 3.5 juta kilogram antara lain pada industri otomotif. Karena beratnya yang ringan sehingga dapat menghemat bahan bakar, penggunaan komposit untuk aplikasi ini dari tahun ke tahun terus meningkat cepat dengan laju pertumbuhan per tahun mencapai 6%. Berbagai komponen otomotif dari material komposit telah dikembangkan, melalui rekayasa optimalisasi komposisi material pembentuknya, proses manufaktur serta proses perlakuan untuk meningkatkan performanya. Penambahan komposisi paduan Cu pada matriks komposit Al3Si-Al2O3/SiC dapat meningkatkan sifat mekanis material komposit untuk aplikasi *disc brake*.

Pengembangan material komposit untuk industri alat kesehatan juga telah dilakukan, yaitu untuk aplikasi roda kastor pada *hospital bed*. Peningkatan penguat 5-15 wt.% *carbon black* pada komposit matriks *polyurethane* dapat meningkatkan *resistivity* dari roda kastor. Penambahan serbuk grafit dapat dilakukan untuk meningkatkan performa roda kastor hasil manufaktur dengan proses *injection molding*. Untuk aplikasi energi, bilah turbin yang terbuat dari komposit canggih baru dapat dibuat lebih panjang, lebih kaku, lebih ringan, dan lebih responsif terhadap pergeseran kecepatan angin yang tiba-tiba daripada bilah yang konvensional.

Penggunaan komposit *nanocarbon graphene oxide* juga telah dikembangkan sebagai komponen penyimpan energi. Pemanfaatan komposit untuk penyimpan energi termal memiliki peluang untuk dikembangkan karena potensi sumber daya yang besar untuk menjamin masa depan yang berkelanjutan, hemat energi, didukung oleh sumber daya dalam negeri.

Rekayasa Material Komposit

untuk Aplikasi Thermal Energy Storage