



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



Sistem Penyimpan Energi Termal untuk Konservasi Energi

Profesor Inge Magdalena Sutjahja

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Bandung

**Aula Barat ITB
21 September 2024**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**SISTEM PENYIMPAN ENERGI TERMAL
UNTUK KONSERVASI ENERGI**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

SISTEM PENYIMPAN ENERGI TERMAL UNTUK KONSERVASI ENERGI

Prof. Inge Magdalena Sutjahja

21 September 2024
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang
Hak penerbitan pada ITB Press
Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin
dari penerbit

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:
Sistem Penyimpan Energi Termal untuk Konservasi Energi

Penulis : Prof. Inge Magdalena Sutjahja
Reviewer : Prof. Idam Arif

Editor Bahasa : Rina Lestari
Cetakan I : 2024
ISBN : 978-623-297-561-3
e-ISBN : 978-623-297-562-0 (PDF)



© Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Tuhan yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang, karena hanya atas rahmat, kasih, dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan buku orasi ilmiah ini. Buku kecil ini merupakan *overview* dari topik penelitian sistem penyimpan energi termal, termasuk beberapa hasil penelitian yang telah penulis lakukan selama sekitar 10 tahun belakangan ini.

Penulisan buku ini dapat terlaksana tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, masukan, dan diskusi pada penyiapan buku ini, khususnya kepada Prof. Idam Arif yang telah berkenan meluangkan waktu untuk *me-review* buku ini, Prof. Surjamanto Wonorahardjo yang banyak memberikan masukan, Dr. Yunita Anggraini dan Sannia Josephine untuk pembuatan ilustrasi gambar. Kami juga sangat berterima kasih pada rekan-rekan kolaborator penelitian, baik dosen dan para mahasiswa bimbingan S-1, S-2, S2P, dan S-3 atas kerja samanya selama ini.

Akhir kata, penulis sangat berharap semoga buku orasi ilmiah ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat umum, untuk perkembangan ilmu pengetahuan khususnya dalam bidang sistem penyimpan energi termal. Kami sangat terbuka terhadap masukan untuk penyempurnaan buku kami berikutnya, dan mohon maaf atas ketidaksempurnaan buku ini.

Bandung, 21 September 2024

Penulis

SINOPSIS

Krisis energi dunia akibat peningkatan populasi dan terbatasnya sumber energi berbasis fosil, ditambah oleh wabah Covid-19 dan perang Ukraina-Rusia, telah mendorong pentingnya sumber-sumber energi alternatif. Selain itu, pembakaran dari sumber energi fosil telah mencemari lingkungan akibat produksi gas rumah kaca (CO_2) yang jumlahnya terus meningkat, yang menyebabkan kenaikan temperatur bumi atau biasa dikenal sebagai pemanasan global (*global warming*). Sistem penyimpanan energi merupakan teknologi yang penting untuk kinerja optimal dari sumber energi alternatif, yaitu sebagai media yang dapat menyimpan energi untuk dapat digunakan pada waktu atau tempat yang lain. Di antara beberapa sumber energi alternatif, energi matahari merupakan sumber energi yang paling melimpah dan ramah lingkungan, dan teknologi penyimpanannya dikenal sebagai penyimpanan energi termal (*thermal energy storage*, TES).

Secara fisis material sistem penyimpanan energi termal bekerja atas dasar salah satu dari 2 metode, yaitu penyimpanan energi dengan memanfaatkan perubahan temperatur dari material (*sensibel TES*) dan perubahan fase dari material (*latent TES*). Material sistem penyimpanan energi termal bekerja atas dasar perubahan fase dikenal sebagai material berubah fase (*phase change material*, PCM). Kinerja utama dari PCM terkait dengan jumlah kalor yang dapat disimpan/dilepaskan dan laju serapan/lepasan kalor. Perubahan fase yang paling lazim digunakan untuk berbagai aplikasi adalah fase padat (*solid*) menjadi cair (*liquid*) atau yang dikenal sebagai proses peleburan (*melting*) atau sebaliknya (solidifikasi).

Klasifikasi PCM terdiri atas material organik, anorganik, dan campuran eutektik. Masing-masing jenis PCM memiliki keunggulan dan kelemahan, di antaranya adalah efek *supercooling* dan efek pemisahan fase untuk PCM anorganik dan konduktivitas termal yang rendah untuk PCM organik. Secara umum upaya untuk reduksi *supercooling* akan memengaruhi kinerja PCM dan laju transfer kalornya. Dua metode pasif dan aktif lazim digunakan untuk minimalisasi sisi negatif dari PCM, yaitu untuk reduksi efek *supercooling* dan pengendalian laju transfer kalor PCM. Cara pasif dengan menggunakan agen nukleator atau dopan kimiawi yang ditambahkan secara langsung pada PCM

sehingga membentuk suspensi yang stabil. Di sisi lain, cara aktif dengan penambahan energi dari agen eksternal, seperti energi mekanik dari gelombang *ultrasound*, energi medan listrik, atau energi medan magnetik.

Buku kecil ini membahas beberapa hasil penelitian yang telah kami lakukan terkait mekanisme *melting* dan solidifikasi PCM, penerapan cara pasif atau/dan aktif untuk reduksi efek *supercooling* dan peningkatan transfer kalor PCM. Beberapa jenis PCM yang telah kami pelajari adalah PCM anorganik berbasis garam hidrat, yaitu *calcium chloride hexahydrate* ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) dan *calcium nitrate tetrahydrate* ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), dan PCM organik berbasis asam lemak (*fatty acid*) yaitu asam laurat (*lauric acid*, $\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_2$) dan minyak kelapa (*coconut oil*). Hasil studi kami secara eksperimen dan simulasi menunjukkan bahwa proses *melting* dan solidifikasi bersifat asimetrik, yaitu tidak hanya berbalik arah proses secara termodinamika. Proses *melting* didominasi oleh transfer kalor secara konveksi, sedangkan proses solidifikasi didominasi oleh transfer kalor secara konduksi. Secara umum pemberian agen nukleator/dopan kimiawi dan penerapan medan listrik atau medan magnet pada proses solidifikasi akan mengurangi *barrier* nukleasi melalui perubahan energi bebas Gibbs, sehingga menghasilkan kondisi yang mendukung bagi proses nukleasi.

Pada bagian akhir dituliskan arah dan lingkup pengembangan sistem penyimpan energi termal, yaitu *shape-stabilized composite PCM* yang menawarkan konversi energi dengan efisiensi yang tinggi dan cairan ionik (*ionic liquid*) sebagai material baru dari PCM. Selain itu, fluida transfer kalor (*heat transfer fluid*), nanofluida, dan nanofluida magnetik (*magnetic nanofluid*, MNF) sebagai medium perpindahan kalor yang mendukung kinerja dari PCM. PCM memiliki potensi aplikasi yang sangat luas, dan pada buku ini kami membahas sedikit gambaran aplikasinya sebagai tambahan massa termal internal (*internal thermal mass*) pada gedung. Akhir kata, kinerja optimal dari sistem penyimpan energi termal tak lepas dari studi komputasi atau simulasi dan pentingnya kerja sama antardisiplin ilmu.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	V
SINOPSIS	VII
DAFTAR ISI.....	IX
DAFTAR GAMBAR	XI
DAFTAR TABEL.....	XV
1 KEBUTUHAN SISTEM PENYIMPAN ENERGI.....	1
1.1 Energi dan Lingkungan	1
1.2 Sistem Penyimpan Energi	2
2 PENYIMPAN ENERGI TERMAL.....	5
2.1 PCM Sebagai <i>Latent</i> TES.....	6
2.2 Solusi untuk Permasalahan Utama PCM	9
3 PARAMETER TERMOFISIKA DAN MEKANISME TRANSISI FASE PCM.....	13
3.1 Parameter Termofisika PCM	13
3.2 Mekanisme Transisi Fase PCM	16
4 UPAYA REDUKSI <i>SUPERCOOLING</i> DAN PENINGKATAN TRANSFER KALOR PCM.....	21
4.1 Pengaruh Agen Nukleator pada Nukleasi PCM CaNT	21
4.2 Efek Medan Listrik Internal pada Nukleasi PCM CaClH.....	23
4.3 Efek Dopan Kimiawi pada Performa Komposit CaClH.....	26
4.4 Pengaruh Medan Magnet pada Nukleasi Komposit PCM	29
5 ARAH DAN LINGKUP PENGEMBANGAN	37
5.1 Pengembangan Material	37
5.2 Peningkatan Kinerja PCM melalui Medium Transfer Kalor....	40
5.3 PCM untuk Berbagai Aplikasi dengan Fokus pada Gedung	42
6 PENUTUP.....	49
7 UCAPAN TERIMA KASIH	51
DAFTAR PUSTAKA.....	55
CURRICULUM VITAE.....	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Klasifikasi sistem penyimpanan energi berdasarkan bentuk energi yang tersimpan (Rahman dkk., 2020).	2
Gambar 2.1	Perbandingan antara <i>sensible</i> TES dan <i>latent</i> TES	5
Gambar 2.2	Klasifikasi dari PCM. Gambar diadaptasi dari Ref (Nishad dan Krupa, 2022).	7
Gambar 2.3	Berbagai jenis PCM dengan kisaran temperatur <i>melting</i> dan entalpi <i>melting</i> -nya (Kordas, 2023)	7
Gambar 2.4	Ilustrasi penambahan agen pengental pada PCM. Gambar dari Ref (Mehling dan Cabeza, 2008).	10
Gambar 2.5	Profil kurva <i>melting</i> dan solidifikasi PCM air yang menunjukkan ilustrasi efek <i>supercooling</i> pada proses solidifikasi.	11
Gambar 2.6	Dua metode untuk reduksi <i>supercooling</i> dan peningkatan transfer kalor PCM.	12
Gambar 3.1	Kurva entalpi-temperatur dari (a) $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Sutjahja dkk., 2018) dan (b) minyak kelapa (Silalahi dkk., 2019).	16
Gambar 3.2	Posisi dan simbol sensor temperatur di dalam bola PCM.	17
Gambar 3.3	Atas: Kontur fraction liquid dan bawah: vektor temperatur pada beberapa waktu dari proses <i>melting</i> PCM. Waktu (<i>t</i>) dalam menit.	17
Gambar 3.4	(a) Distribusi temperatur vertikal dan (b) evolusi fraksi liquid untuk proses <i>melting</i> LA	18
Gambar 3.5	Atas: Kontur fraction liquid dan bawah: vektor temperatur pada beberapa waktu dari proses solidifikasi PCM. Waktu (<i>t</i>) dalam menit.	19
Gambar 3.6	(a) Distribusi temperatur vertikal dan (b) evolusi fraksi solid untuk proses solidifikasi LA	19
Gambar 4.1	Probabilitas nukleasi dari CaNT murni dan CaNT yang ditambahkan dengan 1 wt% agen nukleator (Putri dkk., 2021).	21

Gambar 4.2 Derajat *supercooling* (ΔT_s) dari CaNT murni dan CaNT yang ditambahkan dengan 1 wt% agen nukleator (Putri dkk., 2021). 22

Gambar 4.3 Grafik temperatur terhadap waktu pada proses solidifikasi $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dengan nilai tegangan atau medan listrik yang berbeda (Sutjahja dkk., 2019)..... 23

Gambar 4.4 (a) Data individual waktu induksi (t_{ind}) dan (b) nilai rata-rata dan standard deviasi dari periode kristalisasi (t_c) untuk nilai medan listrik yang berbeda (Sutjahja dkk., 2019) 24

Gambar 4.5 Efek medan listrik pada derajat *supercooling*, ΔT_s , dan periode kristalisasi (t_c) dari CaNT (Putri dkk., 2021). 25

Gambar 4.6 Tipikal kurva T-history dari $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan komposit $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ untuk dopan (a) graphite dan (b) CuO (Sutjahja dkk., 2018) 27

Gambar 4.7 Kurva entalpi bergantung temperatur dari komposit $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ untuk dopan (a) grafit dan (b) CuO (Sutjahja dkk., 2018). 28

Gambar 4.8 (a) Perilaku magnetik dari nanopartikel magnetik, tanpa dan dengan medan magnet eksternal. (b) Hubungan antara ukuran nanopartikel dan struktur domain magnetik yang dinyatakan oleh koersivitas. D_s adalah ukuran superparamagnetisme dan D_c adalah ukuran kritis untuk batas domain tunggal (Adaptasi dari Akbarzadeh dkk., 2012). 29

Gambar 4.9 (a) Profile temperatur terhadap waktu (garis tebal) dan turunannya (garis tipis) selama proses solidifikasi LA dan magneti-komposite LA dalam medan magnet yang berbeda. (b) Analisis parameter temperatur dan waktu karakteristik (Anggraini dkk., 2024) 31

Gambar 4.10 Nilai rata-rata parameter waktu pembekuan vs intensitas medan magnet LA dan LA komposit magnetik untuk dopan (a) Fe_3O_4 dan (b) CoFe_2O_4 , terdiri atas (i) t_f , (b) t_i , dan (c) t_c (Anggraini dkk., 2024). 32

Gambar 4.11 Kebergantungan medan magnet pada konduktivitas termal fase liquid ($T= 55 \text{ }^\circ\text{C}$) dari LA dan komposit

	magnetik (a) LA/Fe ₃ O ₄ dan (b) LA/CoFe ₂ O ₄ (Anggraini dkk., 2024).....	33
Gambar 4.12	Kebergantungan medan magnet pada viskositas (T = 55 °C) dari LA dan komposit magnetik LA, untuk dopan berbeda: (a) Fe ₃ O ₄ dan (b) CoFe ₂ O ₄ (Anggraini dkk., 2024)	34
Gambar 5.1	Struktur kimia kation yang umum digunakan dalam IL, dengan R _n adalah grup alkyl.....	38
Gambar 5.2	Struktur kimia anion yang umum digunakan dalam IL	39
Gambar 5.3	Struktur kimia dari IL: (a)[C16MIM] + X- dan (b) [C16MMIM] + X- . Bola biru pada ring kation adalah atom nitrogen.....	40
Gambar 5.4	Berbagai bidang aplikasi dari PCM (Adaptasi dari Al-Yasiri dan Szabó, 2021).	43
Gambar 5.5	Jumlah publikasi yang diekstrak dari Scopus dengan kata kunci: (a) PCM dan application dan (b) PCM dan <i>building</i>	44
Gambar 5.6	Perbandingan kinerja penyimpanan kalor PCM minyak kelapa terhadap beton, bata, dan air pada rentang temperatur 20-32 °C.....	46
Gambar 5.7	Panil minyak kelapa yang dikonfigurasi secara (a) horizontal dan (b) vertikal (Wonorahardjo dkk., 2019)	46
Gambar 5.8	Formulasi peran dari ETM, ITM dan insulasi atap (Wonorahardjo dkk., 2019).....	47
Gambar 5.9	Perbandingan antara kinerja air dan minyak kelapa sebagai tambahan massa termal internal, yang ditunjukkan dalam bentuk distribusi temperatur vertikal untuk kasus: a) siang hari dan b) malam hari (Wonorahardjo dkk., 2021).....	48

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan kerapatan penyimpanan energi antara <i>sensible</i> TES dan <i>latent</i> TES (Mehling dan Cabeza, 2008).	6
Tabel 2.2	Beberapa kriteria pemilihan PCM untuk penyimpan energi termal (Khan dkk., 2016)	6
Tabel 2.3	Keuntungan dan kerugian PCM organik dan anorganik (Sharma dkk., 2009).	9
Tabel 3.1	Parameter termofisika beberapa jenis PCM anorganik berbasis garam hidrat dan PCM organik berbasis asam lemak.	15
Tabel 3.2	Koordinat sensor temperatur	17
Tabel 4.1	Nilai rata-rata dan standar deviasi dari temperatur nukleasi (T_N), temperatur <i>freezing</i> (T_f), dan derajat <i>supercooling</i> (ΔT_s) dengan nilai medan listrik yang berbeda (Sutjahja dkk., 2019)	24
Tabel 4.2	Nilai rata-rata dan standar deviasi derajat <i>supercooling</i> dari komposit $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ untuk beberapa jenis dan konsentrasi dopant (Sutjahja dkk., 2018).	28

1 KEBUTUHAN SISTEM PENYIMPAN ENERGI

1.1 Energi dan Lingkungan

Energi menjadi hal yang sangat penting bagi kehidupan setiap makhluk di dunia, termasuk manusia. Energi diperlukan dalam berbagai aspek kehidupan manusia, seperti pengolahan makanan, transportasi, komunikasi, dll.. Peningkatan populasi global dan ekspansi ekonomi sangat berkontribusi pada peningkatan kebutuhan energi dunia. Proyeksi terbaru dari International Energy Outlook 2023 memperkirakan konsumsi energi global akan terus meningkat dari tahun 2022 sebesar 34% pada tahun 2050 (International Energy Outlook, 2023). Selain itu, pandemi Covid-19 dan konflik yang terus berlangsung antara Rusia dan Ukraina telah memperparah krisis energi yang secara langsung berdampak pada peningkatan biaya energi untuk pemanasan, pendinginan, transportasi, dan rumah tangga (Farghali dkk., 2023).

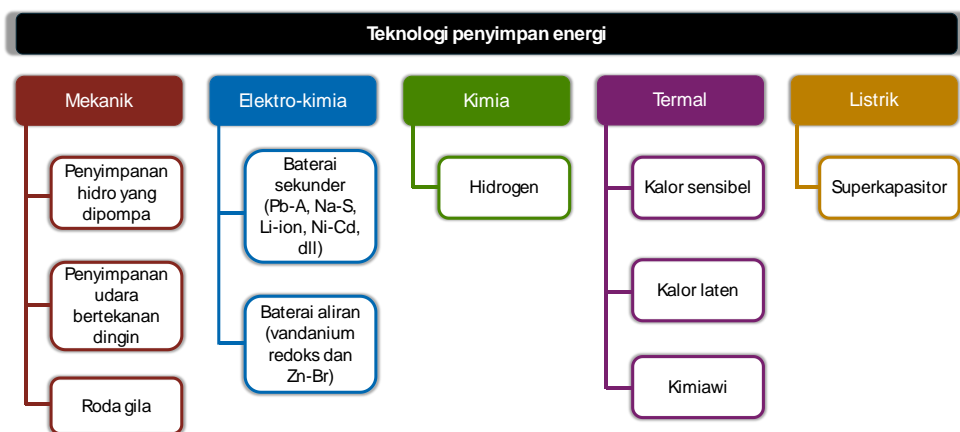
Sejauh ini sumber energi terbesar dalam sektor rumah tangga, industri, dan transportasi adalah berbasis fosil, seperti batu bara, gas alam, dan minyak bumi. Pembakaran dari sumber energi berbasis fosil telah secara kontinu meningkatkan jumlah gas rumah kaca terutama karbon dioksida (CO₂) di udara. Setiap tahun tingkat pencemaran lingkungan terus meningkat akibat bertambahnya jumlah polutan di udara. Emisi gas ini juga berdampak negatif terhadap lingkungan, yaitu berdampak pada perubahan iklim dan peningkatan temperatur atmosfer global yang dikenal sebagai pemanasan global (*global warming*) (Osman dkk., 2023) (Duffey dan Dincer, 2010). Beberapa dampak dari *global warming* adalah munculnya fenomena pulau panas perkotaan (*urban heat island*, UHI), perubahan cuaca global, panas ekstrem, peningkatan energi listrik untuk konsumsi *aircond* (AC) *system* untuk kenyamanan ruang dalam bangunan, penurunan tingkat kesehatan dan kualitas hidup manusia, peningkatan resistensi antimikroba dan patogen, penurunan produktivitas manusia yang berdampak pada ekonomi, dan ancaman sustainability dalam berbagai sektor di seluruh dunia (Abbas dkk., 2022) (Scafetta, 2024) (Kotz dkk., 2024) (Quantifying the Impact of Climate Change on Human Health, 2024).

Untuk mengurangi polusi udara dan untuk mengurangi konsumsi energi berbahan bakar fosil karena jumlahnya yang semakin berkurang, juga dalam

upaya untuk mengembangkan teknologi baru dalam produksi energi untuk memenuhi kebutuhan energi masyarakat modern yang terus meningkat, perlu dilakukan eksplorasi sumber energi alternatif dan terbarukan yang ramah lingkungan. Di antara sumber energi alternatif tersebut adalah energi matahari, angin, gelombang laut, geothermal, energi nuklir, dan biogas (Joshi dkk., 2024) (Dinçer dan Zamfirescu, 2011). Sumber-sumber tersebut mempunyai peranan besar dalam memulihkan keseimbangan alam dengan mengurangi polusi, mengurangi penggunaan sumber daya alam, dan memenuhi kebutuhan energi. Dari antara berbagai sumber energi alternatif dan terbarukan tersebut, energi matahari adalah sumber energi yang jumlahnya paling melimpah (Thirugnanasambandam dkk., 2010) terutama untuk daerah tropis seperti Indonesia.

1.2 Sistem Penyimpan Energi

Untuk menjaga keseimbangan antara sumber daya energi yang berfluktuasi, memanfaatkan energi yang tidak terpakai, mengurangi konsumsi energi, dan mengintegrasikan lebih banyak energi terbarukan merupakan tujuan yang ingin dicapai para ilmuwan, yang dapat terwujud dengan menggunakan sistem penyimpanan energi (Rahman dkk., 2020). Gambar 1.1 memberikan ilustrasi beberapa teknologi sistem penyimpanan energi. Secara umum sistem yang dapat menyimpan energi untuk digunakan pada waktu dan lokasi lain merupakan tantangan bagi "baterai energi" masa depan (Schischke dkk., 2024).

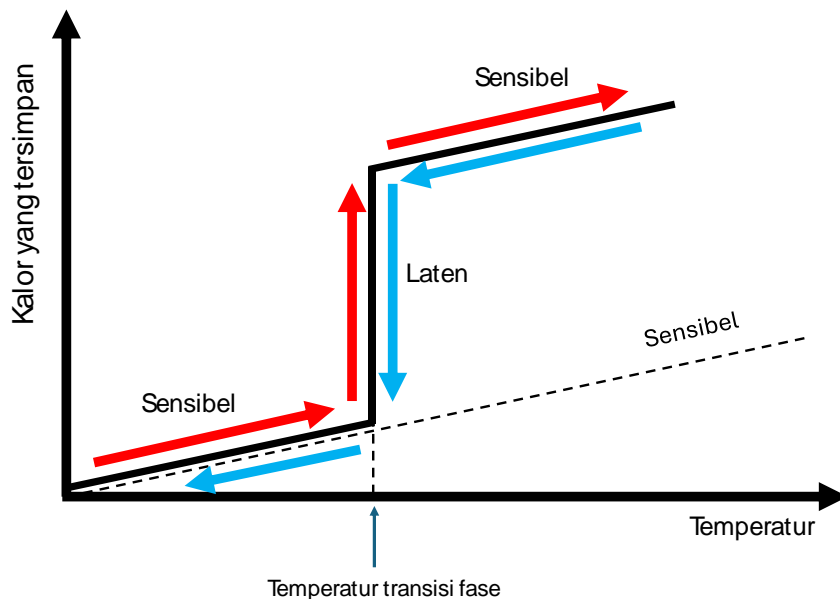


Gambar 1.1 Klasifikasi sistem penyimpanan energi berdasarkan bentuk energi yang tersimpan (Rahman dkk., 2020).

Sistem penyimpanan energi termal (*thermal energy storage*, TES) merupakan salah satu sistem penyimpanan energi yang digunakan untuk menyimpan energi termal. TES menyimpan energi termal melalui proses pendinginan atau pemanasan dari medium penyimpanan, sehingga energi yang tersimpan dapat digunakan pada waktu lain ketika diperlukan untuk aplikasi pemanasan atau pendinginan dan pembangkit daya (Dincer dan Rosen, 2011) (Ali dkk., 2024) (Sarbu dan Sebarchievici, 2018). Sistem TES sangat penting dalam mengatasi ketidakseimbangan antara ketersediaan dan kebutuhan energi (Dincer dan Rosen, 2010). Dibandingkan metode penyimpanan energi lain, TES memiliki beberapa keunggulan, di antaranya adalah efisiensi penyimpanan energi yang cukup baik, ekonomis, biaya investasi dan biaya operasional yang relatif rendah, dan tingkat polusi atau emisi CO₂ yang relatif kecil (Sarbu dan Sebarchievici, 2018). Terdapat beberapa aplikasi dari TES di antaranya pada sektor rumah tinggal atau gedung, fotovoltaik, perangkat elektronik, pembangkit listrik, manajemen termal tubuh manusia, dan generator termoelektrik (Dincer dan Ezan, 2018) (Sadeghi, 2022). Untuk berbagai aplikasi tersebut, efisiensi dari sistem TES memerlukan analisis energi dan exergi, yaitu berdasarkan hukum kedua termodinamika dan dengan memperhitungkan temperatur lingkungan serta periode paparan *input* kalor.

2 PENYIMPAN ENERGI TERMAL

Secara umum metode fisis untuk penyimpanan energi termal (*thermal energy storage*, TES) dibagi menjadi dua, yaitu penyimpanan kalor sensibel (*sensible TES*) dan penyimpanan kalor laten (*latent TES*) (Dinçer dan Rosen, 2011). Metode penyimpanan *sensible TES* secara umum didasarkan pada kenaikan temperatur dari material tanpa ada perubahan fase, sedangkan *latent TES* didasarkan pada perubahan fase dari material yang terjadi pada temperatur yang (relatif) konstan. Perubahan fase yang paling sering digunakan dalam berbagai aplikasi adalah padat menjadi cair (*melting*) atau sebaliknya (solidifikasi). Medium *latent TES* dikenal sebagai material berubah fase atau *phase change material* (PCM) (Fleischer, 2015) (Harald dan Cabeza, 2008). Gambar 2.1 menunjukkan perbandingan energi termal dan Tabel 2.1 menunjukkan kerapatan energi yang tersimpan antara *sensible TES* dan *latent TES*, dengan *latent TES* menggunakan PCM yang memanfaatkan transisi fase padat (*solid*)-cair (*liquid*) (Bruno dkk., 2015). Dari gambar tersebut terlihat bahwa kapasitas penyimpanan energi termal *latent TES* lebih besar daripada *sensible TES*. Selain itu *latent TES* menawarkan keragaman dari material PCM dengan nilai temperatur *melting* dan entalpi yang berbeda-beda (Sarbu dan Sebarchievici, 2018).



Gambar 2.1 Perbandingan antara *sensible TES* dan *latent TES*

Tabel 2.1 Perbandingan kerapatan penyimpanan energi antara *sensible* TES dan *latent* TES (Mehling dan Cabeza, 2008).

Sistem penyimpanan energi	Material	Kerapatan energi		Catatan
		(MJ/m ³)	kJ/kg	
Sensibel TES	air	84	84	$\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
	granit	50	17	$\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
Laten TES dengan kalor laten melting	air	306	330	Temperatur melting: $0\text{ }^{\circ}\text{C}$
	Parafin	180	200	Temperatur melting: $5\text{-}130\text{ }^{\circ}\text{C}$
	Garam hidrat	300	200	Temperatur melting: $5\text{-}130\text{ }^{\circ}\text{C}$
	Garam	600-1500	300-700	Temperatur melting: $300\text{-}800\text{ }^{\circ}\text{C}$
Laten TES dengan kalor laten evaporasi	air	2452	2450	Kondisi <i>ambient</i>

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1, PCM sebagai medium dari *latent* TES dapat menyimpan kalor per volume dalam jumlah sekitar 3 hingga 4 kali lebih besar dibandingkan dengan material padat atau cair dari *sensible* TES dalam interval suhu $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

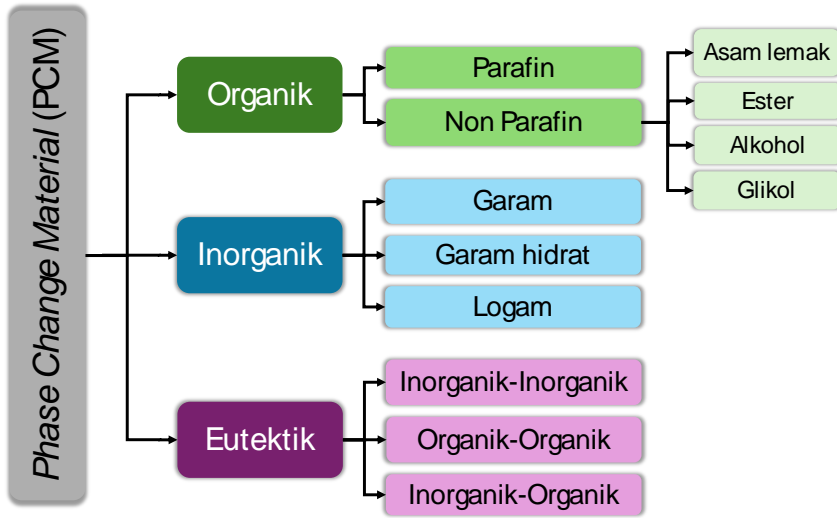
2.1 PCM Sebagai *Latent* TES

PCM untuk berbagai aplikasi harus memenuhi beberapa kriteria dari sisi termal, fisik, kimia, kinetik, dan ekonomi (Sharma dkk., 2009), seperti ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Beberapa kriteria pemilihan PCM untuk penyimpan energi termal (Khan dkk., 2016)

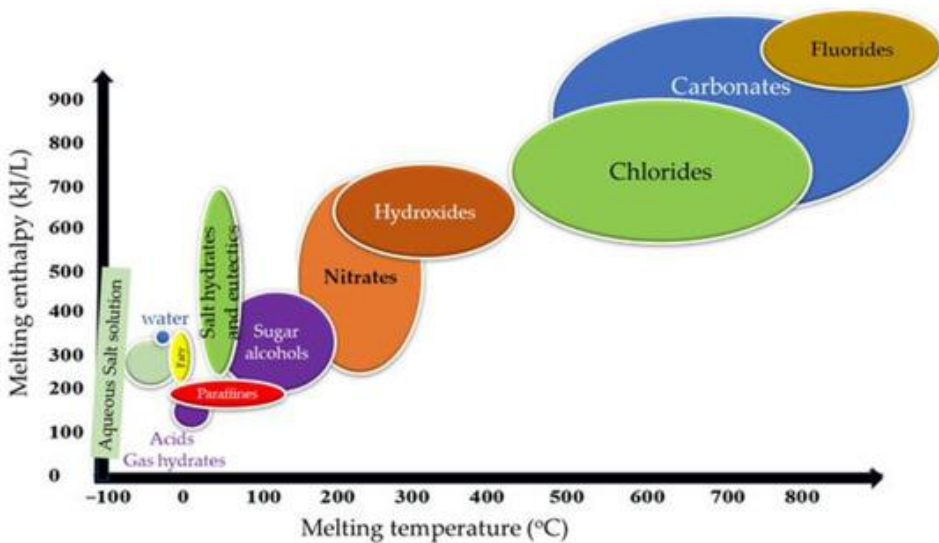
Termal	Fisik	Kimia	Kinetik	Ekonomi
Suhu transisi fase yang sesuai dengan aplikasinya	Tekanan uap rendah ($<1\text{ bar}$)	Sesuai dengan material kontainernya	Laju kristalisasi tinggi	Biaya efektif
Kalor laten dan kalor jenis yang tinggi	Densitas besar dan perubahan volume yang kecil	Stabilitas kimia yang tinggi dan waktu hidup yang panjang	Laju nukleasi tinggi untuk menghindari supercooling	Jumlahnya yang melimpah
Konduktivitas termal yang tinggi	Stabilitas fase yang tinggi	Tidak mudah terbakar, tidak beracun, dan tidak mudah meledak		Mudah tersedia

Secara umum, PCM diklasifikasikan menjadi 2, yaitu PCM organik dan PCM anorganik, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Klasifikasi dari PCM. Gambar diadaptasi dari Ref (Nishad dan Krupa, 2022).

Kaitan antara temperatur *melting* dan entalpi *melting* untuk berbagai jenis PCM ditunjukkan pada Gambar 2.3. Dari gambar tersebut terlihat bahwa kerapatan energi kira-kira sebanding dengan temperatur *melting*. Selain itu, PCM anorganik umumnya memiliki nilai entalpi *melting* per massa yang lebih tinggi daripada PCM organik.



Gambar 2.3 Berbagai jenis PCM dengan kisaran temperatur *melting* dan entalpi *melting*-nya (Kordas, 2023)

Sejauh ini PCM yang paling banyak digunakan adalah air (H_2O). Selain sebagai PCM, air juga sangat umum digunakan sebagai *sensible* TES dan medium perpindahan kalor atau fluida transfer kalor (*heat transfer fluid*, HTF). PCM anorganik terdiri atas logam, garam, dan garam hidrat. Garam hidrat dapat dianggap sebagai paduan garam anorganik dan air yang membentuk kristal garam air dengan rumus umum $AB \cdot nH_2O$. Di sisi lain, asam lemak (*fatty acid*) yang digunakan sebagai PCM adalah asam lemak jenuh (*saturated fatty acid*) dengan formula umum $CH_3(CH_2)_nCOOH$.

Eutektik PCM (EPCM) adalah campuran homogen yang terdiri atas dua, tiga, atau lebih PCM yang dapat tercampur sempurna dalam keadaan cair. Campuran eutektik PCM dapat berupa kombinasi antara PCM organik dan PCM organik, atau PCM anorganik dan PCM anorganik, ataupun PCM organik dan PCM anorganik, yang dikombinasikan untuk mendapatkan material baru dengan temperatur *melting* yang berbeda dan sifat-sifat yang lebih baik dibandingkan material penyusunnya, seperti peningkatan kalor *latent*, reduksi efek *supercooling*, reduksi viskositas, dan peningkatan konduktivitas termal (Sun dkk., 2023). Pada umumnya EPCM meleleh pada sebuah nilai tunggal temperatur *melting* yang nilainya lebih rendah dari unsur-unsurnya. Sifat ini menjadikan EPCM ideal untuk mendapatkan material baru dengan rentang suhu perubahan fasa yang tidak dapat dicapai oleh PCM komponen tunggal. Salah satu contoh PCM eutektik adalah campuran antara air dan garam yang membentuk larutan dengan temperatur *melting* di bawah $0\text{ }^\circ\text{C}$, karena penambahan garam akan mengurangi temperatur *melting* (Mehling dan Cabeza, 2008).

Masing-masing dari jenis PCM mempunyai keuntungan dan kerugian. PCM anorganik, misalnya air dan garam hidrat, memiliki konduktivitas termal yang tinggi, enthalpi fusi yang tinggi, dan tidak mudah terbakar (Kenisarin dan Mahkamov, 2016). Namun kekurangan utama dari PCM garam hidrat adalah bersifat korosif dan mengalami *supercooling* saat proses solidifikasi (Purohit dan Sistla, 2020). Untuk berbagai aplikasi, PCM organik misalnya asam lemak atau *fatty acid* memiliki beberapa keunggulan dibandingkan PCM anorganik di antaranya tidak korosif, tekanan uap yang kecil, stabilitas termal yang baik, stabilitas kimia yang baik, dan *supercooling* yang sangat kecil atau tidak ada (Sari, 2003). Namun kekurangannya adalah konduktivitas termal yang rendah karena hanya terdiri atas atom-atom C, H, dan O (Yuan dkk., 2014). Konduktivitas termal merupakan salah satu parameter termofisika

yang menentukan laju perpindahan panas dalam material. Tabel 2.3 merangkum keuntungan dan kerugian dari masing-masing jenis PCM.

Tabel 2.3 Keuntungan dan kerugian PCM organik dan anorganik (Sharma dkk., 2009).

Jenis PCM	Keuntungan	Kerugian
Organik	Stabilitas kimia dan termal yang baik	Konduktivitas termal kecil
	Tidak korosif	Mudah terbakar
	Supercooling kecil/tidak ada	Ekspansi volume yang tinggi
	Tekanan uap kecil	
	Mencair secara kongruen	
	Dapat di daur ulang	
Anorganik	Konduktivitas termal tinggi	Derajat <i>supercooling</i> yang besar
	Tidak mudah terbakar	Korosif
	Ekspansi volume yang rendah	Efek pemisahan fase
	Enthalpi perubahan fasa dan densitas energi yang besar	Pelelehan yang tidak kongruen
	Dapat didaur ulang dengan biaya yang relatif murah	Tidak stabil secara termal maupun kimia
Eutektik	Suhu leleh yang tajam	Masih belum banyak data termofisis yang melaporkan
	Mencair secara kongruen	Bau yang cukup kuat
		Mahal

2.2 Solusi untuk Permasalahan Utama PCM

Seperti ditunjukkan pada Tabel 2.3, masalah utama dari PCM anorganik berbasis garam hidrat adalah efek pemisahan fase saat proses solidifikasi dan efek *supercooling* atau *subcooling* yang cukup besar, sedangkan untuk PCM organik adalah konduktivitas termalnya yang relatif rendah.

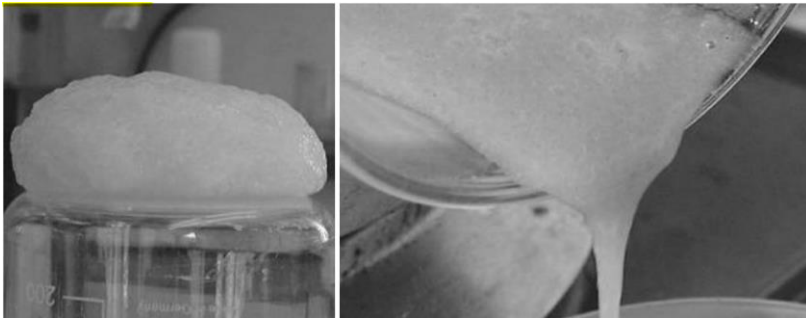
Efek pemisahan fase dari PCM anorganik berbasis garam hidrat merupakan karakteristik natural karena garam hidrat merupakan campuran antara air dan garam dalam komposisi tertentu sehingga membentuk ikatan kimiawi dengan struktur tertentu. Secara singkat efek pemisahan fase terkait dengan perubahan jumlah hidrat dari PCM garam hidrat pada saat transformasi fase liquid menjadi solid karena transformasi fasenya yang bersifat *incongruent*, seperti ditunjukkan oleh reaksi berikut:



atau reaksi yang melibatkan pembentukan garam anhidrat,



Cara yang lazim digunakan untuk reduksi efek pemisahan fase pada PCM adalah dengan penambahan agen pengental atau agen pembentuk gel (*thickening/gelling agents*) (Cong dkk., 2022). *Thickening agents* adalah aditif yang berfungsi untuk meningkatkan viskositas PCM, sedangkan *gelling agents* ditambahkan pada fluida liquid untuk membentuk struktur gel. Walaupun berbeda dalam mekanisme reduksi pemisahan fase, keduanya menghasilkan efek imobilisasi dan stabilisasi bentuk PCM. Dikarenakan viskositas yang tinggi, maka fase-fase yang berbeda tidak dapat terpisah jauh sampai akhirnya seluruh PCM memadat. Penambahan *thickening/gelling agents* sedikit banyak juga akan memengaruhi kinerja PCM, seperti derajat *supercooling*, kapasitas penyimpanan dan kinetika *charging/discharging* (Cong dkk., 2022). Gambar 2.4 memberi ilustrasi peningkatan viskositas PCM dengan penambahan agen pengental.

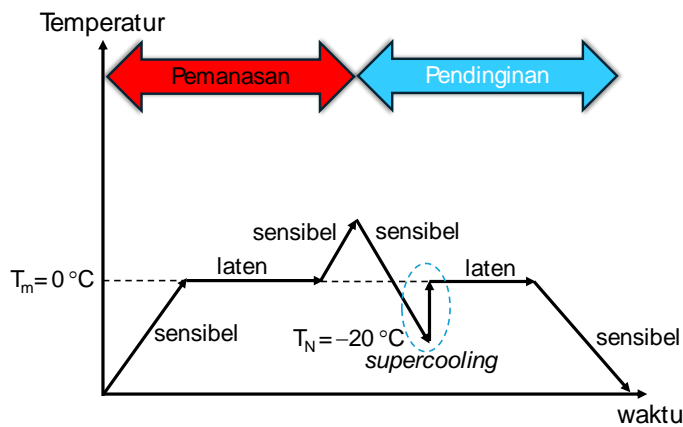


Gambar 2.4 Ilustrasi penambahan agen pengental pada PCM. Gambar dari Ref (Mehling dan Cabeza, 2008).

Fenomena *supercooling* dapat dipandang sebagai penghalang (*barrier*) bagi proses nukleasi, yaitu pembentukan inti kristal yang stabil. Proses nukleasi ini dapat ditinjau dari 2 sudut pandang, yaitu teori nukleasi klasik dan teori nukleasi kuantum. Teori nukleasi klasik melibatkan energi bebas Gibbs sebagai parameter termodinamika. Di sisi lain, menurut teori nukleasi kuantum, nukleasi berkaitan dengan probabilitas *tunneling* bagi sebuah partikel tunggal melalui *barrier potential* (Maris, 2006). Proses nukleasi sangat penting dalam berbagai cabang ilmu pengetahuan, yaitu dari pembentukan alam semesta awal, metalurgi, fisika atmosfer, dan biologi.

Fenomena *supercooling* diilustrasikan pada Gambar 2.5 untuk pemanasan dan pendinginan dari air. Es mencair pada temperatur 0 °C, tetapi perlu temperatur yang jauh lebih rendah (misalnya -20 °C) untuk membeku. Dalam hal ini penurunan temperatur yang berkaitan dengan lepasan kalor sensibel

fase liquid pada proses solidifikasi terus berlanjut hingga temperatur di bawah titik *melting/freezing* tanpa terjadi perubahan fase dari liquid menjadi solid. Hal ini karena lepasan kalor laten mengalami hambatan yang berkaitan dengan barrier nukleasi (Glicksman, 2011). Perbedaan temperatur antara titik melting (T_m) dan temperatur saat inti kristal pertama kali terbentuk (temperatur nukleasi, T_N) disebut derajat *supercooling* (ΔT_s). Nilai ΔT_s tergantung pada beberapa hal, seperti sifat fisik material, jumlah sampel, dan kondisi pada proses solidifikasi (Glicksman, 2011).

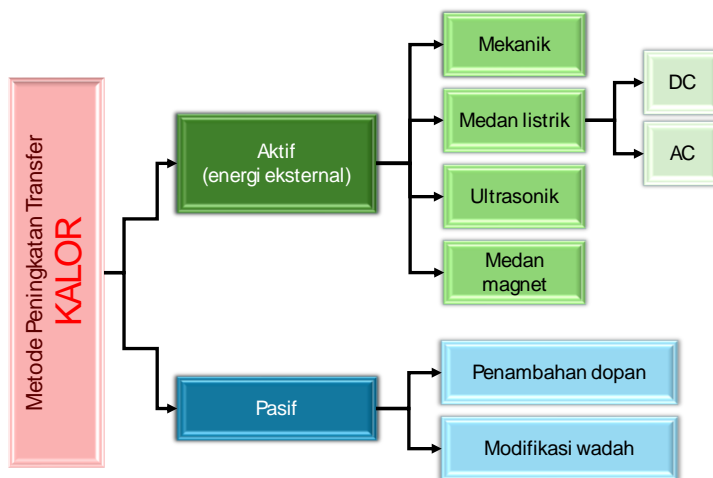


Gambar 2.5 Profil kurva *melting* dan solidifikasi PCM air yang menunjukkan ilustrasi efek *supercooling* pada proses solidifikasi.

Efek *supercooling* yang merupakan karakteristik umum dari garam hidrat merupakan hal negatif yang perlu diminimalisir dalam upaya optimasi kinerja material sebagai sistem penyimpanan energi termal. Upaya reduksi efek *supercooling* ini secara umum dibagi menjadi 2, yaitu cara pasif dan cara aktif. Cara pasif dilakukan dengan menyisakan sebagian fase padat atau kristal dari PCM itu sendiri (*seed*) atau penambahan material lain sebagai agen nukleasi yang dikenal sebagai agen nukleator (*nucleating agent*) (Beaupere dkk., 2018). Pengembangan agen nukleator untuk PCM umumnya berdasarkan salah satu dari dua metode (Lane, 1991), yaitu metode ilmiah dan metode Edisonian. Metode ilmiah dilakukan dengan memilih kandidat material agen nukleator berdasarkan keserupaannya dengan PCM dari sisi parameter kristalografi, sedangkan metode Edisonian dilakukan dengan memilih agen nukleator berdasarkan intuisi, biasanya menggunakan stok bahan kimia yang tersedia di laboratorium. Dalam beberapa kasus, tidak ada penjelasan logis terkait efektivitas material yang diperoleh. Di sisi lain, cara aktif untuk reduksi efek

supercooling dilakukan dengan penambahan energi mekanik misalnya dari gelombang bunyi *ultrasound*, energi medan listrik, atau energi medan magnetik (Zahir dkk., 2019) (Zhao dkk., 2020). Secara umum upaya reduksi efek *supercooling* akan memengaruhi laju transfer kalor PCM, yang secara umum dilihat dari parameter waktu karakteristik pada proses transisi fase.

Upaya peningkatan konduktivitas termal atau secara umum laju transfer kalor terutama pada PCM organik menggunakan beberapa metode, di antaranya metode *triggering* aktif dan *triggering* pasif, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6. Metode *triggering* pasif dilakukan dengan memanipulasi sifat internal material misalnya dengan penambahan dopant pada PCM, sehingga membentuk komposit PCM. Namun upaya ini secara tidak langsung memberikan dampak pada perubahan parameter termofisis PCM dan laju transfer kalor pada PCM. Metode *triggering* aktif dilakukan dengan memberikan energi dari agen eksternal, seperti energi gelombang mekanik dan bunyi seperti *ultrasound*, energi medan listrik, atau medan magnet (Beaupere dkk., 2018) (Wu dkk., 2020).



Gambar 2.6 Dua metode untuk reduksi *supercooling* dan peningkatan transfer kalor PCM.

Terkait karakter stokastik dari nukleasi (Myerson, 2015), proses solidifikasi untuk uji efektivitas cara pasif dan cara aktif yang banyak dilakukan pada penelitian kami perlu dilakukan untuk beberapa kali iterasi, supaya hasil yang diperoleh dapat dianalisis lebih lanjut secara statistik.

3 PARAMETER TERMOFISIKA DAN MEKANISME TRANSISI FASE PCM

3.1 Parameter Termofisika PCM

Parameter termofisika yang utama dari PCM terkait dengan jumlah kalor yang dapat disimpan/dilepaskan dan laju transfer kalor antara PCM dan lingkungan. Jumlah kalor yang tersimpan dalam PCM sebagai sistem *latent* TES diformulasikan menurut Persamaan (3.4) (Lane dan Shamsundar, 1983).

$$Q = \int_{T_0}^{T_m} m \cdot c_{p,s} \cdot dT + m \cdot a_m \cdot \Delta h + \int_{T_m}^{T_e} m \cdot c_{p,l} \cdot dT \quad (3.1)$$

dengan $m = \rho V$ adalah massa dari PCM dengan temperatur melting (T_m), $c_{p,s}$ dan $c_{p,l}$ masing-masing adalah kapasitas kalor spesifik fase padat (*solid*) dan fase cair (*liquid*), a_m adalah fraksi *melting*, Δh adalah lompatan entalpi spesifik, T_0 dan T_e adalah temperatur awal dan akhir dari proses. Densitas material ρ adalah ρ_s dan ρ_l , masing-masing untuk fase solid dan liquid. Untuk proses yang melibatkan tekanan konstan, maka perubahan kalor sama dengan perubahan entalpi. Namun seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2 dan 2.3, sebagian besar PCM bukan merupakan bahan murni dan oleh karena itu pada umumnya temperatur *melting* bukan merupakan nilai tunggal, melainkan sebuah rentang nilai. Dengan demikian jumlah kalor yang tersimpan pada umumnya adalah fungsi dari temperatur. Oleh karena itu, parameter yang lebih tepat untuk menggambarkan kinerja PCM adalah jumlah kalor yang tersimpan sebagai fungsi temperatur dalam interval temperatur tertentu, atau entalpi sebagai fungsi temperatur, $h(T)$. Sebagai catatan, pada umumnya T_m tidak sama dengan temperatur *freezing* atau solidifikasi (T_f), dan selisihnya juga dapat didefinisikan sebagai derajat *supercooling* (ΔT_s). Parameter termofisika PCM yang lain berkaitan dengan stabilitas termal adalah temperatur dekomposisi (T_d).

Pertukaran kalor antara PCM dan lingkungan didominasi oleh modus transpor kalor secara konduksi dan konveksi (Zalba dkk., 2003). Perpindahan kalor secara konduksi didasarkan pada hukum Fourier, yang menjelaskan bahwa laju perpindahan kalor yang melalui konduktor sebanding dengan

gradient temperatur $\left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right)$ dan luas daerah (A) yang dilalui kalor tersebut, sesuai dengan formula

$$\dot{Q} = -k \left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right) A \quad (3.2)$$

dengan laju perpindahan kalor, \dot{Q} dan k adalah konduktivitas termal. Konduktivitas termal merupakan sifat intrinsik dari suatu material yang mencirikan kemampuannya untuk menghantarkan kalor secara konduksi. Kemampuan material untuk mengonduksi kalor relatif terhadap kemampuannya untuk menyimpan kalor dikenal sebagai difusivitas termal (Kreith dkk., 2011),

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (3.3)$$

Konduktivitas termal untuk fase solid dan liquid masing-masing adalah k_s dan k_l . Pada fase solid konduktivitas termal terutama berkaitan dengan vibrasi dari getaran kisi kristal atau fonon, sedangkan pada fase liquid konduktivitas termal terutama berkaitan dengan difusi molekular dan tumbukan antarmolekul (Kreith dkk., 2011). Secara umum nilai konduktivitas termal fase solid lebih besar daripada fase liquid karena interaksi molekular lebih baik untuk transpor kalor (Welty dkk., 2007). Pada fase liquid dari PCM atau komposit PCM, konduktivitas termal secara umum dipengaruhi oleh viskositas, yaitu parameter yang mencirikan ketahanan atau hambatan terhadap gerakan molekul di dalam suatu fluida (Mohanty, 1951). Viskositas yang tinggi menghalangi aliran molekul untuk perpindahan kalor, sehingga mengurangi kepadatan daya dari PCM. Dengan kata lain, viskositas memengaruhi laju perpindahan panas dan kepadatan daya dari PCM.

Selain perpindahan kalor dengan modus konduksi, arus konveksi yang terkait dengan perpindahan kalor secara konveksi didefinisikan sebagai proses perpindahan kalor yang melibatkan pergerakan aliran zat cair atau gas dari satu tempat yang memiliki temperatur tinggi ke tempat yang memiliki temperatur lebih rendah. Dalam bentuk yang paling sederhana intensitas transfer kalor konvektif sebanding dengan beda temperatur (ΔT) dan lazim dinyatakan melalui rumusan pendinginan Newton (*Newton's law of cooling*) sebagai berikut (Cengel, 2002):

$$\dot{Q} = -hA\Delta T \quad (3.4)$$

dengan h adalah koefisien transfer kalor konvektif dan A luas permukaan untuk transfer kalor. Koefisien h bergantung pada beberapa faktor eksternal, seperti jenis fluida, tekanan, dan kecepatan fluida. Konveksi terbagi menjadi dua jenis, yaitu konveksi alami dan konveksi terpaksa. Konveksi alami terjadi karena adanya perbedaan kerapatan antara dua fase material, sedangkan konveksi terpaksa terjadi karena pengaruh faktor eksternal, seperti tekanan, pompa, atau kipas.

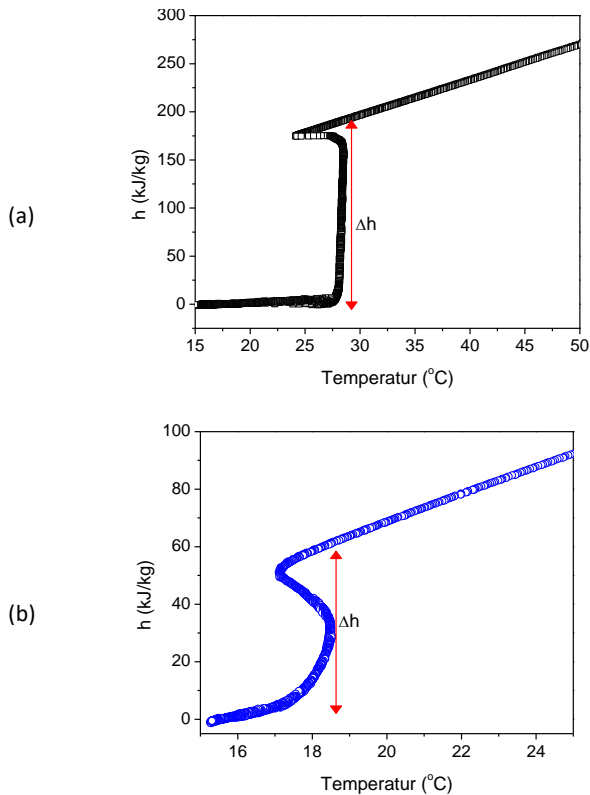
Tabel 3.1 Parameter termofisika beberapa jenis PCM anorganik berbasis garam hidrat dan PCM organik berbasis asam lemak.

Jenis PCM	Material/rumus kimiawi/singkatan	Parameter termofisika	Referensi
Anorganik garam hidrat	<i>Calcium chloride hexahydrate</i> / CaCl ₂ ·6H ₂ O/CaClH	$T_m = 29\text{ }^\circ\text{C}$ $h_m = 190\text{ kJ/kg}$ $c_{p,s}/c_{p,l} = 2,10 / 1,42\text{ kJ/kg.K}$ $k_s/k_l = 1,088 / 0,540\text{ W/m.K}$	(Sutjahja dkk., 2018) (Lane, 2018)
	<i>Calcium nitrate tetrahydrate</i> / Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O/CaNT	$T_m = 42-47\text{ }^\circ\text{C}$ $h_m = 121-153\text{ kJ/kg}$ $c_{p,s}/c_{p,l} = 1.08-1.66\text{ kJ/kg.K}$ $k_s/k_l = 0,4229 / 0,3749\text{ W/m.K}$	(Honcova dkk., 2020) (Hattori dkk., 1986)
	<i>Cobalt nitrate hexahydrate</i> Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O / CoNHH	$T_m = 55-60\text{ }^\circ\text{C}$ $h_m = 128-140\text{ kJ/kg}$ $c_{p,s}/c_{p,l} = 1,082-1,682\text{ kJ/kg.K}$ $k_s/k_l = -$	(Honcova dkk., 2020) (Rahman dkk., 2021)
Organik asam lemak	<i>Lauric acid</i> /C ₁₂ H ₂₄ O ₂ /LA	$T_m = 43\text{ }^\circ\text{C}$ $h_m = 187\text{ kJ/kg}$ $c_{p,s}/c_{p,l} = 2,18 / 2,39\text{ kJ/kg.K}$ $k_s/k_l = 0,204 / 0,145\text{ W/m.K}$	(Yusuf dkk., 2021) (Shokouhmand dan Kamkari, 2013)
	Minyak kelapa (<i>coconut oil</i>)	$T_m = 23-26\text{ }^\circ\text{C}$ $h_m = 82-103\text{ kJ/kg}$ $c_{p,s}/c_{p,l} = 3,75 / 2,01\text{ kJ/kg.K}$ $k_s/k_l = 0,228 / 0,166\text{ W/m.K}$	(Silalahi dkk., 2017) (Saleel, 2022)

Secara umum penentuan parameter termofisika dapat dilakukan melalui 2 cara, yaitu pengukuran secara langsung dan secara tak langsung dengan metode T-history (Yinping dkk., 1999) atau modifikasinya (Hong dkk., 2004). Grafik entalpi terhadap temperatur, $h(T)$, lazim menggunakan metode yang diusulkan oleh Marin dkk. (Marin dkk., 2003). Beberapa jenis PCM yang telah penulis pelajari beserta parameter termofisikanya ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Ilustrasi grafik entalpi spesifik terhadap temperatur, $h(T)$, dari PCM anorganik CaCl₂·6H₂O (Sutjahja dkk., 2018) dan PCM organik minyak kelapa (Silalahi dkk., 2019) ditunjukkan pada Gambar 3.1. Dari gambar tersebut

terlihat bahwa kurva entalpi minyak kelapa berbeda dengan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Dalam hal ini fase laten minyak kelapa tidak terjadi pada temperatur konstan, yang mungkin disebabkan oleh sifat transisi fase yang bertahap atau gradual, karena komposisinya yang terdiri atas campuran berbagai jenis asam lemak dengan jumlah terbanyak asam laurat sekitar 50% (Bhatnagar dkk., 2009).



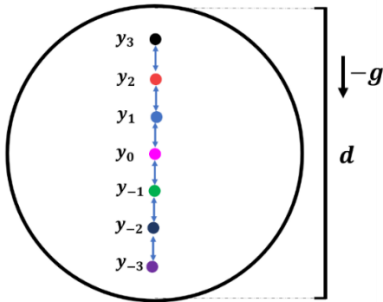
Gambar 3.1 Kurva entalpi-temperatur dari (a) $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Sutjahja dkk., 2018) dan (b) minyak kelapa (Silalahi dkk., 2019).

3.2 Mekanisme Transisi Fase PCM

Mekanisme transisi fase (*melting* dan *solidifikasi*) PCM dilakukan melalui studi eksperimen dan simulasi dengan menggunakan *software* Ansys. Gambar 3.2 menunjukkan ilustrasi penempatan beberapa sensor dalam konfigurasi vertikal di dalam bola dan Tabel 3.2 adalah koordinat sensor yang bersangkutan.

Studi dilakukan untuk PCM asam laurat (*lauric acid*, LA) yang ditempatkan dalam kulit bola dengan variasi diameter dan temperatur permukaan yang konstan (T_s). Gambar 3.3 memberikan ilustrasi evolusi

proses *melting* pada bola berukuran 30 mm dan $T_s = 80\text{ }^\circ\text{C}$, sedangkan Gambar 3.4 menunjukkan distribusi temperatur vertikal pada waktu-waktu tertentu sesuai dengan peningkatan 5% dari fraksi liquid (β). Di sisi lain gambar yang bersesuaian untuk evolusi proses solidifikasi ditunjukkan pada Gambar 3.5 dan Gambar 3.6 untuk evolusi fraksi solid ($1-\beta$).

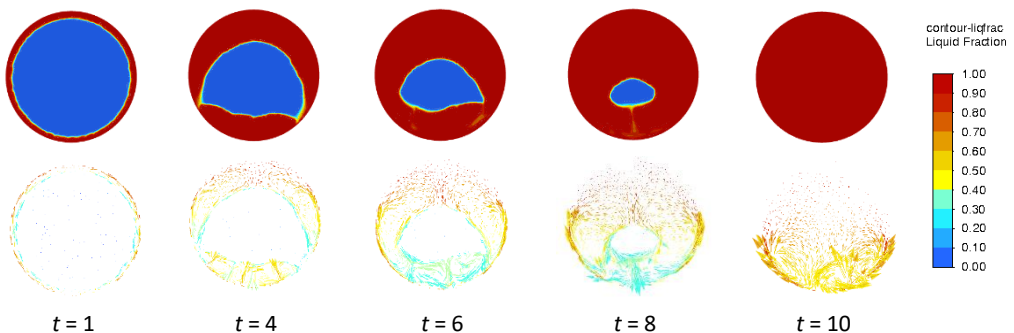


Gambar 3.2 Posisi dan simbol sensor temperatur di dalam bola PCM.

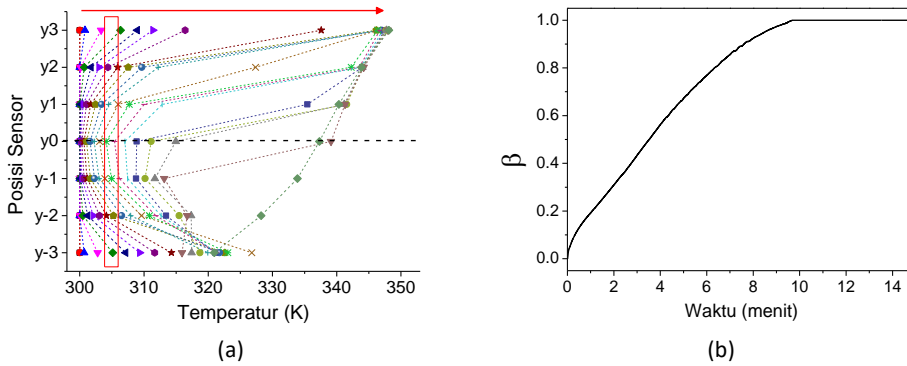
Tabel 3.2 Koordinat sensor temperatur

Simbol	Koordinat (x,y)
y_3	$(0, \frac{3}{4}d)$
y_2	$(0, \frac{1}{2}d)$
y_1	$(0, \frac{1}{4}d)$
y_0	$(0, 0)$
y_{-1}	$(0, -\frac{1}{4}d)$
y_{-2}	$(0, -\frac{1}{2}d)$
y_{-3}	$(0, -\frac{3}{4}d)$

Untuk proses *melting*, dimulai dari kondisi awal dengan PCM LA dalam fase solid dengan transfer kalor konduktif, pertumbuhan liquid terjadi pada bagian sampel yang berdekatan dengan batas dinding dan antarmuka solid-liquid. Pertumbuhan vektor kecepatan terjadi secara simultan akibat distribusi temperatur yang tidak homogen, di mana temperatur pada lapisan luar yang berdekatan dengan dinding lebih tinggi daripada temperatur pada lapisan sebelah dalam. Karena konveksi yang digerakkan oleh gaya apung, liquid yang panas di sebelah dinding akan naik ke atas menggantikan liquid dingin yang bergerak ke bawah sepanjang permukaan solid dari PCM. Kondisi ini menciptakan pusaran sirkulasi yang terbentuk antara solid PCM dan dinding bagian dalam dari bola, yang mulai terlihat sejak menit ke-1.



Gambar 3.3 Atas: Kontur fraction liquid dan bawah: vektor temperatur pada beberapa waktu dari proses *melting* PCM. Waktu (t) dalam menit.

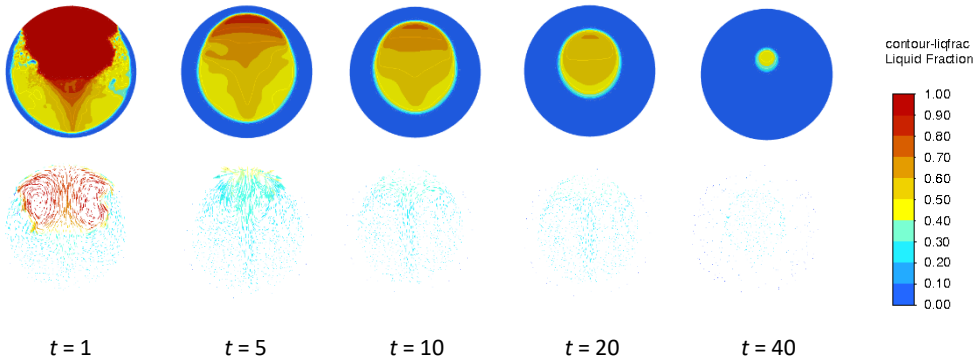


Gambar 3.4 (a) Distribusi temperatur vertikal dan (b) evolusi fraksi liquid untuk proses *melting* LA

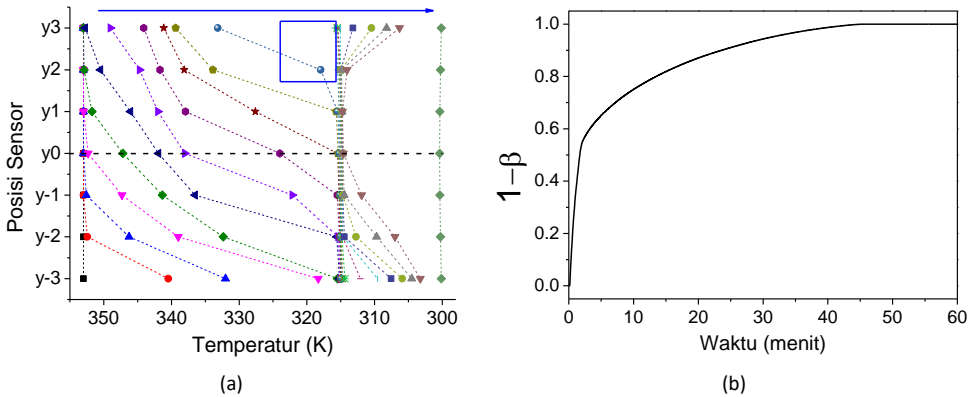
Ketika semakin banyak PCM yang menjadi liquid, ukuran pusaran ini akan bertambah, diikuti dengan peningkatan vektor kecepatan pada bagian bawah bola. Dalam hal ini antarmuka solid-liquid tidak lagi simetris secara bola, dengan struktur cekung di bagian atas dan struktur yang lebih datar di bagian bawah, seperti yang ditunjukkan pada gambar pada menit ke-4. Selain itu, fluktuasi temperatur yang besar teramati pada setengah bola bagian bawah, karena besarnya arus konveksi yang disebabkan oleh ketidakstabilan lapisan liquid di mana liquid dingin berada di sebelah atas dan liquid panas di sebelah bawah. Dari Gambar 3.4, kenaikan temperatur terkecil ditunjukkan untuk sensor di bagian tengah, yaitu y_0 or y_{-1} , yaitu berkaitan dengan akhir dari fase solid.

Untuk proses solidifikasi, kondisi awal adalah PCM LA dalam fase liquid dengan perpindahan kalor konvektif. Dengan pendinginan, temperatur liquid yang berdekatan dengan dinding bagian dalam akan menurun, sehingga menghasilkan antarmuka solid-liquid yang simetris bola. Selanjutnya, konveksi yang digerakkan oleh gaya apung menggerakkan liquid yang lebih dingin ke bawah karena kerapatannya yang lebih tinggi. Dalam hal ini, lapisan solid terbentuk di bagian bawah dari bola, dan antarmuka solid-liquid relatif sejajar dengan bidang batas pendinginan. Dengan bertambahnya fraksi solid terjadi transisi dari dominasi transfer kalor dari konveksi menjadi konduksi. Dalam kondisi ini bentuk antarmuka solid-liquid relatif simetris bola, dengan lapisan fase solid yang lebih tebal di bagian bawah bola hingga PCM mencapai fase solid sepenuhnya pada menit ke-45. Dari Gambar 3.8, distribusi temperatur simetris pada fase sensibel solid, dan homogenitas distribusi

temperatur terjadi secara spontan ketika fraksi solid mencapai nilai maksimum.



Gambar 3.5 Atas: Kontur fraction liquid dan bawah: vektor temperatur pada beberapa waktu dari proses solidifikasi PCM. Waktu (t) dalam menit



Gambar 3.6 (a) Distribusi temperatur vertikal dan (b) evolusi fraksi solid untuk proses solidifikasi LA

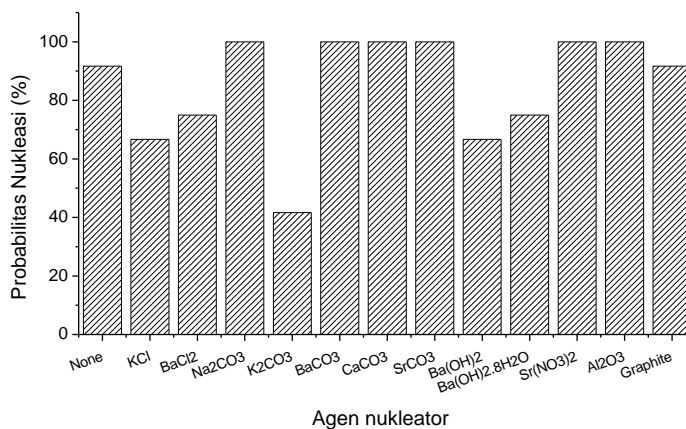
Dari mekanisme yang terjadi pada proses *melting* dan solidifikasi terlihat bahwa proses melting dan solidifikasi bukan merupakan suatu proses simetris (Sutjahja dkk., 2024). Oleh karenanya, proses *melting* membutuhkan waktu yang jauh lebih singkat daripada solidifikasi karena dominasi konveksi pada proses *melting* sedangkan proses solidifikasi didominasi oleh perpindahan kalor secara konduksi. Dengan bertambahnya ukuran bola atau nilai temperatur permukaan, intensitas konveksi pada proses *melting* semakin meningkat. Dikarenakan dominasi konveksi, proses *melting* dari PCM sangat dipengaruhi oleh fluida di sekitarnya. Asimetri antara proses melting dan solidifikasi PCM terkait erat dengan asimetri antara proses pemanasan dan pendinginan, yaitu terkait dengan kinematika termal dari sistem mikroskopis (Ibáñez dkk., 2024).

4 UPAYA REDUKSI SUPERCOOLING DAN PENINGKATAN TRANSFER KALOR PCM

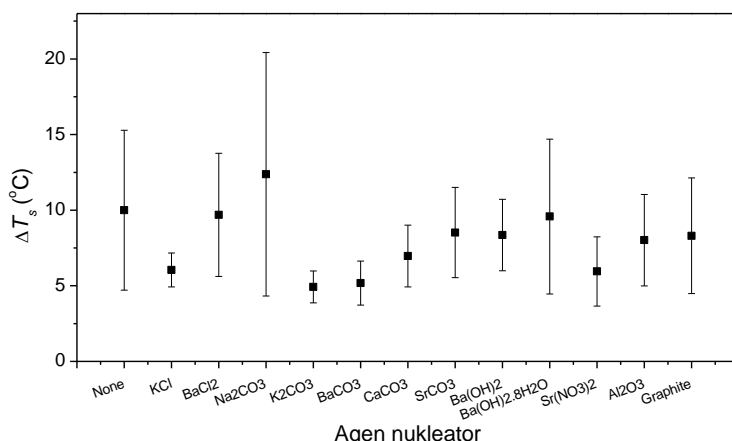
4.1 Pengaruh Agen Nukleator pada Nukleasi PCM CaNT

Metode pasif untuk reduksi efek *supercooling* PCM lazim menggunakan agen nukleator. Berdasarkan struktur kristalnya, agen nukleator diklasifikasikan menjadi isomorphous, isotypic, and epitaxial (Lane, 1991). Agen nukleator isomorphous dan isotypic memiliki struktur kristal dan yang serupa dengan PCM, ditambah dengan keserupaan struktur kimiawi untuk agen nukleator isomorphous. Di sisi lain, agen nukleator epitaxial memiliki morfologi kristal yang berbeda dengan PCM. Dipelopori oleh Telkes (Telkes, 1952), Lane (Lane, 1991) mengkaji secara detail efektivitas dari beberapa agen nukleator untuk beberapa PCM berbasis garam hidrat. Selain itu, efektivitas agen nukleator juga dikaitkan dengan kemungkinan reaksi kimia yang terjadi menyangkut pertukaran ion antara PCM dan agen nukleator.

Untuk PCM anorganik $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (CaNT), kami mengkaji efektivitas beberapa jenis agen nukleator yang dikelompokkan berdasarkan jenis anionnya, yaitu klorida (Cl^-), karbonat (CO_3^{2-}), hidroksida (OH^-), nitrat (NO_3^{2-}), dan dopan tipe lainnya (Al_2O_3 dan graphite). Untuk anion tertentu, agen nukleator disusun berdasarkan posisi kation dalam tabel periodik. Efektivitas diukur dari probabilitas nukleasi (Gambar 4.1) dan derajat supercooling, DT_s (Gambar 4.2) (Putri dkk., 2021).



Gambar 4.1 Probabilitas nukleasi dari CaNT murni dan CaNT yang ditambahkan dengan 1 wt% agen nukleator (Putri dkk., 2021)

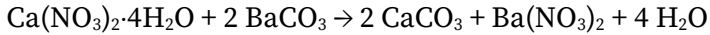


Gambar 4.2 Derajat *supercooling* (ΔT_s) dari CaNT murni dan CaNT yang ditambahkan dengan 1 wt% agen nukleator (Putri dkk., 2021).

Probabilitas nukleasi 100% ditunjukkan oleh anion karbonat kecuali K_2CO_3 , sedangkan anion OH^- dan Cl^- menunjukkan probabilitas nukleasi yang relatif rendah. Nilai DT_s dari CaNT dengan agen nukleasi K_2CO_3 menunjukkan nilai rata-rata terendah dan standar deviasi terkecil dibandingkan yang lain, tetapi nilai probabilitas nukleasi rendah yaitu 40%. Penurunan nilai rata-rata DT_s dengan agen nukleator grafit dan Al_2O_3 hanya sekitar 1 °C. Secara keseluruhan, anion CO_3^{2-} dan NO_3^{2-} umumnya menghasilkan efek yang positif pada nukleasi CaNT, kecuali K_2CO_3 . Namun, meskipun probabilitas nukleasinya 100%, rata-rata DT_s dari CaNT yang menggunakan agen nucleator Na_2CO_3 lebih tinggi dibandingkan CaNT murni. Dengan demikian hasil terbaik diperoleh untuk agen nukleator $BaCO_3$ dengan probabilitas nukleasi 100% dan $\Delta T_s = 5,18$ °C, dibandingkan dengan $\Delta T_s = 9,08$ °C untuk CaNT murni.

Dari kajian struktur kristal, CaNT memiliki struktur kristal monoclinic dengan grup ruang $P2_1/n$ dan dimensi unit cell $a = 6,277$ Å, $b = 9,157$ Å, $c = 14,484$ Å, dan sudut $\alpha = \gamma = 90^\circ$, $\beta = 98,6^\circ$ (Ribar B. dan Divjaković V., 1973). Di sisi lain, $BaCO_3$ memiliki struktur kristal orthorhombic dengan grup ruang $Pm\bar{c}n$ dan dimensi unit cell $a = 5,31459$ Å, $b = 8,90428$ Å, $c = 6,43409$ Å, serta sudut $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ (De Villiers J.P.R., 1971). Data ini menunjukkan bahwa $BaCO_3$ memiliki struktur kristal yang berbeda dengan CaNT. Oleh karena itu, efektivitas $BaCO_3$ dalam nukleasi CaNT juga ditentukan oleh anion yang sesuai dan kedekatan kation dalam tabel periodik. Dalam hal ini posisi kation Ba^{2+}

dari agen nukleator BaCO_3 berdekatan dengan kation Ca^{2+} dari CaNT, sehingga dalam reaksi potensial mungkin terjadi pertukaran pasangan sebagai berikut,

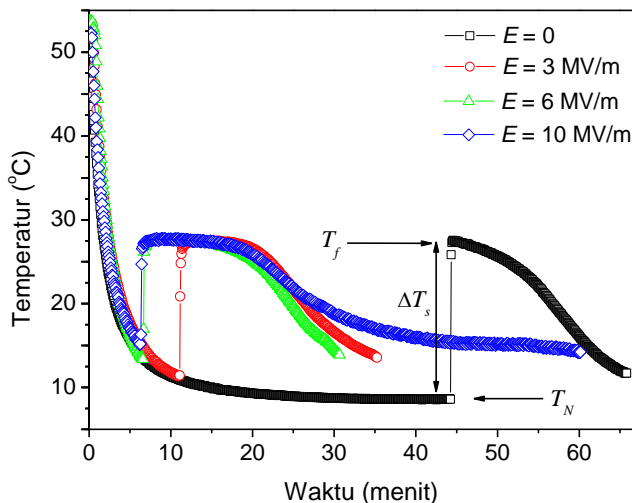


Pembentukan senyawa baru akibat pertukaran pasangan kation anion tersebut memberikan kondisi yang menguntungkan untuk nukleasi CaNT.

4.2 Efek Medan Listrik Internal pada Nukleasi PCM CaClH

Medan listrik juga dapat digunakan untuk reduksi efek supercooling PCM berbasis garam hidrat. Secara eksperimen kami mempelajari aplikasi medan listrik internal (Alexander dan Radacsi, 2019) pada nukleasi PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (CaClH) dan $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (CaNT), efektivitasnya dikaitkan dengan kekuatan medan ligand dari anion.

Data elektrofreesing untuk CaClH ditunjukkan pd Gambar 4.3, untuk beberapa nilai medan listrik yang diterapkan secara kontinu dari temperatur 25 °C (Sutjahja dkk., 2019). Untuk setiap kurva, temperatur nukleasi (T_N) ditentukan sebagai kurva suhu-waktu minimum, dan ini menandakan dimulainya nukleasi. Lepasn kalor laten setelah proses nukleasi dan pertumbuhan kristal dapat dilihat dari kenaikan suhu yang tajam hingga mencapai nilai tertentu yang disebut suhu beku (T_f). Derajat *supercooling* (ΔT_s) ditentukan sebagai selisih antara T_f dan T_N .



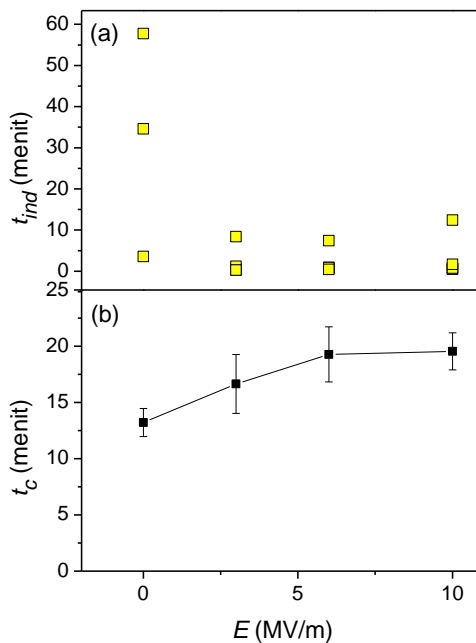
Gambar 4.3 Grafik temperatur terhadap waktu pada proses solidifikasi $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dengan nilai tegangan atau medan listrik yang berbeda (Sutjahja dkk., 2019)

Nilai rata-rata dan standard deviasi dari T_N , T_f , dan ΔT_s untuk nilai tegangan atau medan listrik yang berbeda ditunjukkan pada **Tabel 4.1**. Terlihat bahwa dengan bertambahnya kuat medan listrik, T_N bergeser ke nilai yang lebih tinggi, sedangkan T_f hampir konstan, sehingga ΔT_s berkurang.

Tabel 4.1 Nilai rata-rata dan standar deviasi dari temperatur nukleasi (T_N), temperatur *freezing* (T_f), dan derajat *supercooling* (ΔT_s) dengan nilai medan listrik yang berbeda (Sutjahja dkk., 2019)

V (kV)	E (V/m)	$T_N \pm \Delta$ (°C)	$T_f \pm \Delta$ (°C)	$\Delta T_s \pm \Delta$ (°C)
0	0	9,19 ± 2,19	27,33 ± 0,37	18,13 ± 2,56
1,5	3×10 ⁶	12,73 ± 2,16	27,20 ± 0,29	14,47 ± 2,23
3,0	6×10 ⁶	14,17 ± 3,71	27,55 ± 0,09	13,39 ± 3,72
5,0	10×10 ⁶	15,13 ± 1,88	27,56 ± 0,23	12,42 ± 1,79

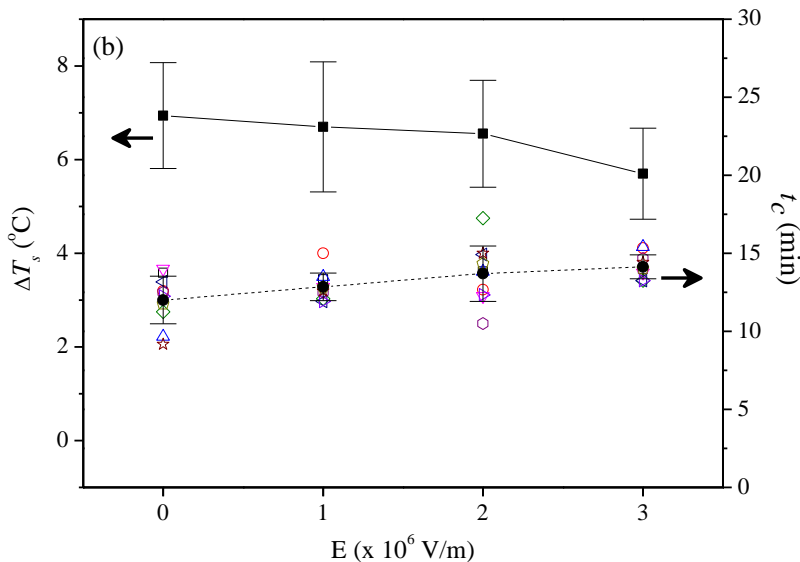
Di sisi lain, ketergantungan medan listrik terhadap waktu induksi (t_{ind}) dan periode kristalisasi (t_c) ditunjukkan pada Gambar 4.4. Nilai waktu induksi jauh lebih rendah dibandingkan dengan kasus tanpa medan, demikian pula dengan sebaran nilainya, walaupun karakter stokastik yang kuat tetap muncul.



Gambar 4.4 (a) Data individual waktu induksi (t_{ind}) dan (b) nilai rata-rata dan standard deviasi dari periode kristalisasi (t_c) untuk nilai medan listrik yang berbeda (Sutjahja dkk., 2019)

Dengan bertambahnya nilai medan listrik, t_c cenderung bertambah besar, dan diduga terkait dengan efek pemanasan Joule atau Ohmik yang terjadi karena peran arus listrik yang dominan.

Pengaruh medan listrik untuk nukleasi CaNT seperti ditunjukkan pada Gambar 4.5 juga menunjukkan berkurangnya nilai ΔT_s dan meningkatnya nilai t_c dengan peningkatan intensitas E (Putri dkk., 2021). Dari gambar tersebut, ΔT_s menurun hampir linier, dengan gradien tertinggi diperoleh untuk medan terbesar, sedangkan t_c menurun secara linier dengan peningkatan intensitas E . Efektivitas medan listrik untuk reduksi efek supercooling CaNT lebih rendah daripada CaClH, yang mungkin berkaitan dengan medan ligand anion NO_3^{-2} yang lebih kuat dibandingkan dengan medan ligand anion Cl^- (Putri dkk., 2021).



Gambar 4.5 Efek medan listrik pada derajat supercooling, ΔT_s , dan periode kristalisasi (t_c) dari CaNT (Putri dkk., 2021).

Hasil yang diperoleh untuk penerapan medan listrik ini menunjukkan bahwa medan listrik dapat menekan sifat stokastik dari nukleasi sehingga mengubah karakter nukleasi menjadi fenomena yang lebih deterministik. Efektivitas medan listrik tersebut dapat dijelaskan secara termodinamika melalui perubahan energi bebas Gibbs pada proses solidifikasi. Dengan penerapan medan listrik luar E , perubahan energi bebas Gibbs bagi pembentukan inti kristal berbentuk bola di bawah pengaruh medan listrik dapat ditulis sebagai

$$\Delta G_E = 4\pi r^2 \sigma - \frac{4}{3}\pi r^3 (\Delta G_v + PE) \quad (4.1)$$

Selanjutnya dengan minimisasi persamaan di atas, akan diperoleh persamaan untuk jari-jari kritis (r_E^*) dan energi bebas Gibbs kritis (ΔG_E^*) di bawah pengaruh medan listrik, sebagai berikut:

$$r_E^* = \frac{2\sigma}{(\Delta G_v + PE)} \quad (4.2)$$

$$\Delta G_E^* = \frac{16\pi\sigma^3}{3(\Delta G_v + PE)^2} \quad (4.3)$$

Dari Persamaan (4.1) dan (4.2) terlihat bahwa pengaruh medan listrik adalah memberikan suku tambahan pada penyebut, sehingga ukuran kritis untuk pembentukan kristal dan energi bebas Gibbs kritis berkurang dibandingkan kasus tanpa medan listrik. Ketika ukuran kritis untuk pembentukan kristal telah tercapai, energi bebas Gibbs berkurang seiring dengan bertambahnya volume kristal. Nukleasi terjadi secara spontan ketika perubahan energi bebas Gibbs sistem bernilai negatif. Selanjutnya pengurangan energi bebas Gibbs kritis dengan medan listrik akan meningkatkan laju nukleasi dan berkurangnya waktu induksi, sesuai dengan hasil pengamatan eksperimen (Gambar 4.3).

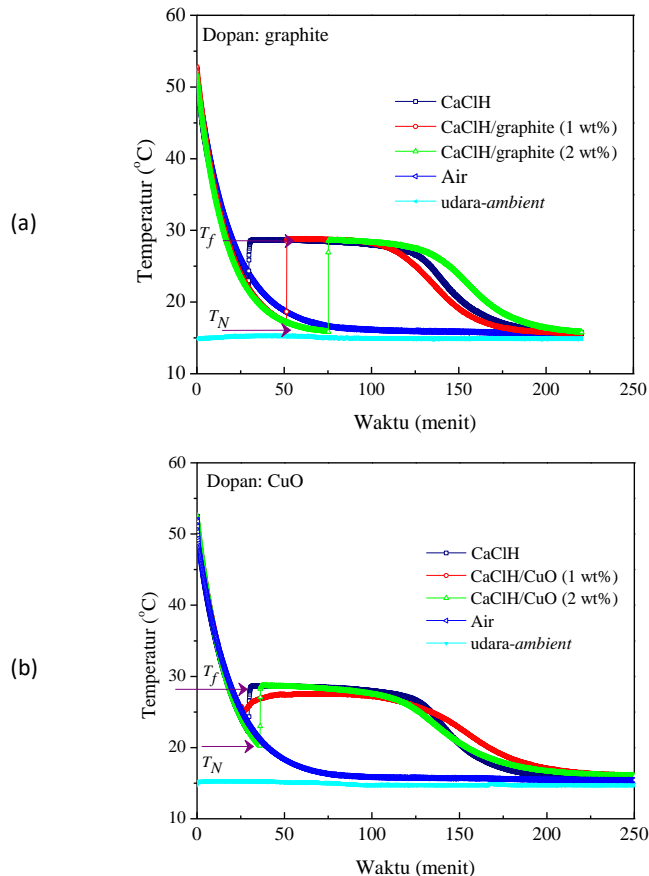
4.3 Efek Dopan Kimiawi pada Performa Komposit CaClH

Komposit PCM (*phase change composite*, PCC) adalah modifikasi dari PCM untuk mengatasi sisi negatif dari PCM, seperti konduktivitas termal yang kecil, kebocoran liquid, pemisahan fase, atau *supercooling*. Pada umumnya modifikasi dilakukan secara kimiawi atau dengan penambahan aditif fungsional, yang ditujukan untuk meminimalisasi kelemahan berbagai jenis PCM supaya dapat digunakan dalam skala aplikasi yang besar (Radouane, 2022).

Dopan kimiawi yang digunakan dalam PCM untuk membentuk komposit PCM lazim menggunakan partikel berukuran nano yang lazim dikenal sebagai nanopartikel. Nanopartikel berukuran 1-100 nm, dan berdasarkan bentuknya dapat diklasifikasikan menjadi material 0D, 1D, 2D atau 3D. Struktur dari sebuah nanopartikel dapat dipandang terdiri atas tiga lapisan, yaitu lapisan permukaan yang dapat difungsikan dengan berbagai molekul kecil, ion

logam, surfaktan, atau polimer, lapisan kulit (*shell*) yang secara kimiawi merupakan bahan yang berbeda dari inti dalam semua aspek, dan inti (*core*) yang pada dasarnya merupakan bagian tengah dari nanopartikel dan biasanya mengacu pada nanopartikel itu sendiri (Khan dkk., 2019). Dikarenakan karakteristiknya yang luar biasa, nanopartikel telah menarik minat para peneliti dari berbagai bidang ilmu dengan potensi aplikasinya yang besar.

Pada penelitian yang kami lakukan, sintesis komposit PCM menggunakan metode *two step* yang lazim digunakan untuk sintesis nanofluida (Babar dan Ali, 2019), yaitu persiapan dopan dan suspensi secara terpisah. Dopan yang telah ada ditambahkan ke liquid PCM sesuai dengan konsentrasi massa/volume. Campuran tersebut kemudian dilakukan homogenisasi dengan pengadukan manual, pengaduk mekanik, pengaduk magnetik, atau dengan memaparkan pada gelombang *ultrasound*.

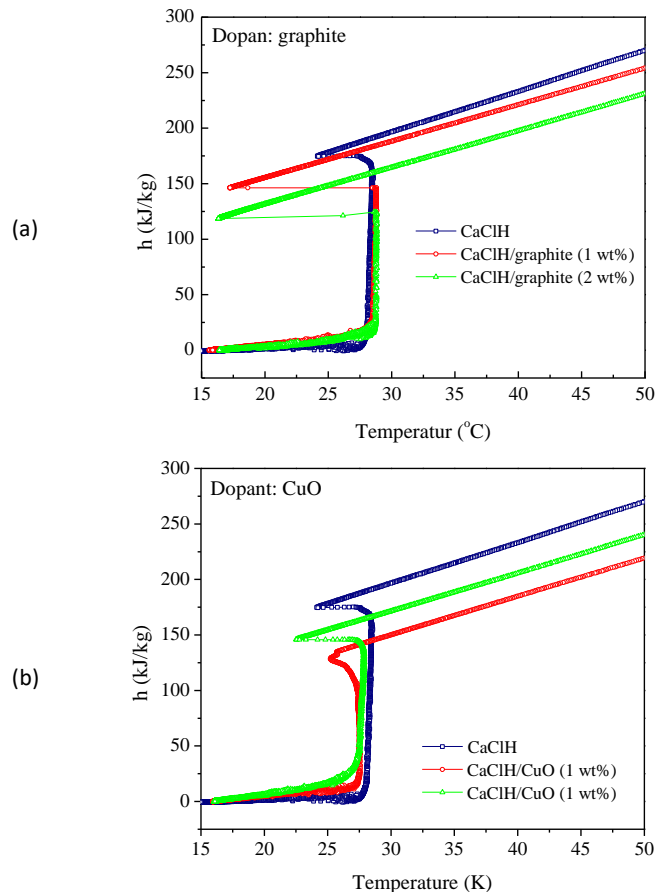


Gambar 4.6 Tipikal kurva T-history dari $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan komposit $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ untuk dopan (a) graphite dan (b) CuO (Sutjahja dkk., 2018)

Efektivitas dopan nanopartikel untuk PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dilakukan dengan menerapkan metode T-history, dengan penambahan agen nukleator BaSO_4 (1 wt%) dan jenis dopan grafit dan CuO , masing-masing konsentrasi dopan 1 dan 2 wt%. Data T-history yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 4.6 (Sutjahja dkk., 2018), dan nilai rata-rata dan standard deviasi ΔT_s ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Nilai rata-rata dan standar deviasi derajat *supercooling* dari komposit $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ untuk beberapa jenis dan konsentrasi dopant (Sutjahja dkk., 2018).

Parameter	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Komposit $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$			
		Dopant graphite		Dopant CuO	
		1 wt%	2 wt%	1 wt%	2 wt%
$\Delta T_s \pm \Delta(\text{°C})$	5,60±1,73	10,44±1,20	12,70±0,14	3,28±1,28	6,93±2,15

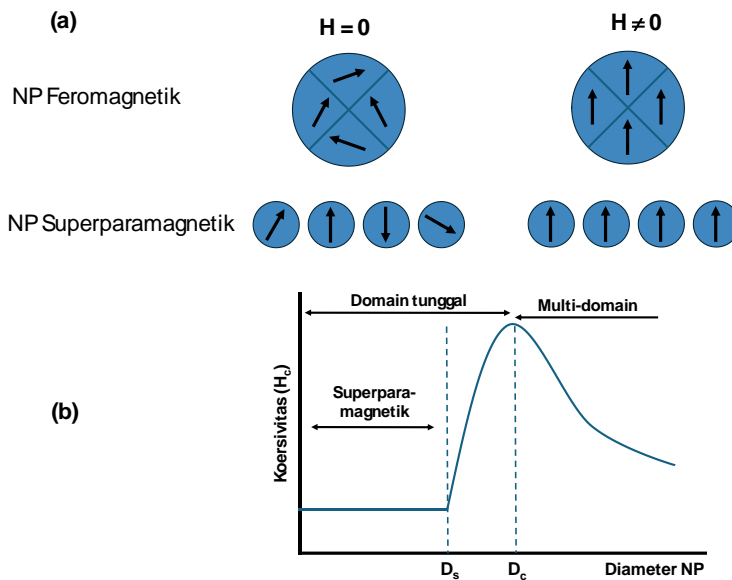


Gambar 4.7 Kurva entalpi bergantung temperatur dari komposit $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ untuk dopan (a) grafit dan (b) CuO (Sutjahja dkk., 2018).

Analisis lebih lanjut data T-history tersebut menghasilkan kurva entalpi spesifik terhadap temperatur seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7. Dari gambar tersebut, loncatan entalpi terkait transisi fase solid-liquid bergantung pada konsentrasi dan jenis dopan pada PCM.

4.4 Pengaruh Medan Magnet pada Nukleasi Komposit PCM

Magnetik nanopartikel adalah logam atau oksida logam nanopartikel yang memiliki sifat magnetik (feromagnetik atau superparamagnetik), seperti Co, Ni, Fe₃O₄, Fe₂O₃ atau spinel ferrites MFe₂O₄ dengan M adalah ion logam transisi divalen seperti Ni, Co, Zn, Cu, dll.



Gambar 4.8 (a) Perilaku magnetik dari nanopartikel magnetik, tanpa dan dengan medan magnet eksternal. (b) Hubungan antara ukuran nanopartikel dan struktur domain magnetik yang dinyatakan oleh koersivitas. D_s adalah ukuran superparamagnetisme dan D_c adalah ukuran kritis untuk batas domain tunggal (Adaptasi dari Akbarzadeh dkk., 2012).

Gambar 4.8 menunjukkan perilaku magnetisasi dari nanopartikel magnetik tanpa dan dengan medan magnet eksternal (H). Tanpa pengaruh medan luar, nanopartikel feromagnetik akan mempertahankan sebuah magnetisasi total, sedangkan nanopartikel superparamagnetik tidak akan menghasilkan magnetisasi total karena pembalikan momen magnet yang cepat. Dengan penerapan medan magnet luar, domain-domain dari nanopartikel feromagnetik akan sejajar dengan medan magnet, demikian

pula momen magnet dari nanopartikel superparamagnetik dengan domain tunggal (Akbarzadeh dkk., 2012).

Perbedaan utama dopan magnetik dengan dopan non-magnetik adalah interaksi dipolar antarpartikel yang cukup kuat, bahkan tanpa medan magnet luar, yang lazim dinyatakan oleh konstanta kopling dipolar (Rosensweig, 1985)

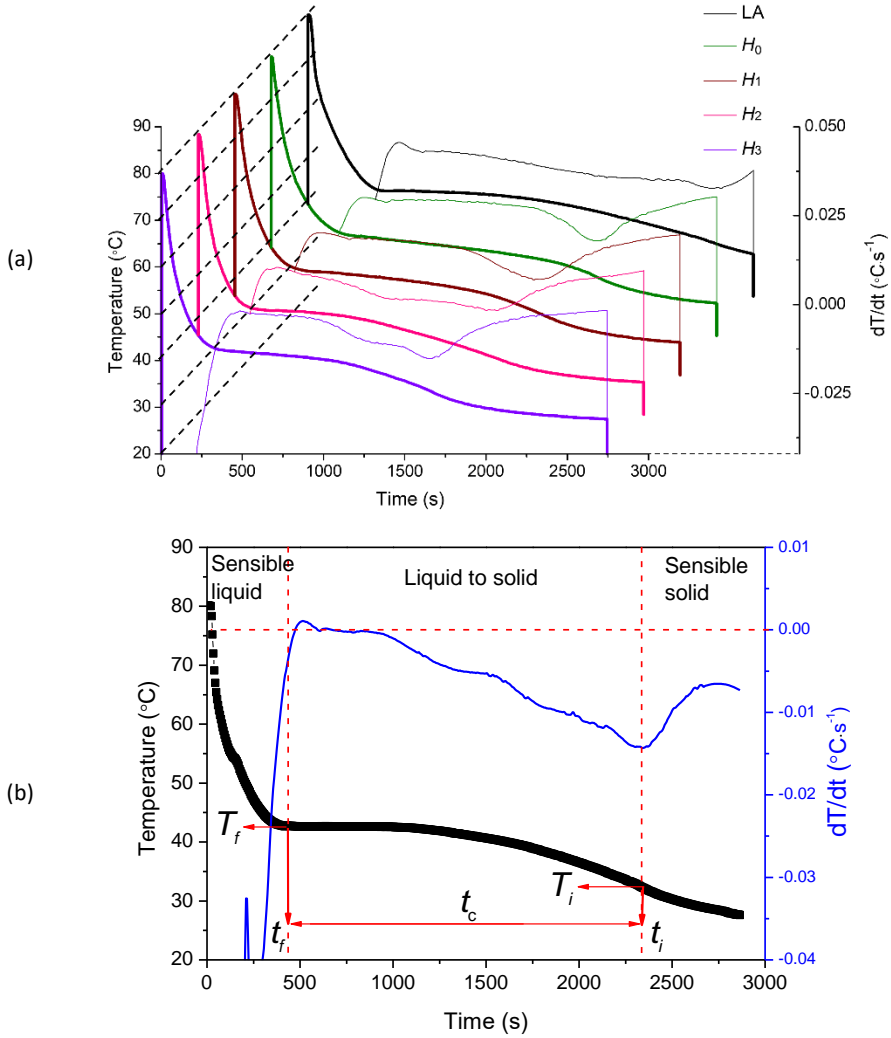
$$\lambda = \frac{\mu_0 m^2 / 2\pi r^3}{k_B T} \quad (4.4)$$

dengan m adalah momen magnetik dan r jarak antarpartikel. Tanpa penerapan medan magnet luar, energi Brownian diharapkan menjaga momen bergerak acak karena energi termal melebihi gaya tarik dipolar ($\lambda < 1$), sehingga nanofluida magnetik berperilaku sebagai media isotropik. Sebaliknya, jika $\lambda > 1$, peran dominan energi interaksi dipolar bertanggung jawab atas pembentukan dan keseimbangan struktur agregat rantai, bahkan tanpa penerapan medan magnet (Vargas dkk., 2005). Karena energi interaksi dipolar ini, struktur seperti rantai terjadi untuk ukuran dipol yang cukup besar, bahkan tanpa penerapan medan magnet luar (Butter dkk., 2003).

Kinerja dopan dan medan magnetik untuk PCM asam laurat (lauric acid, LA) dipelajari secara eksperimen untuk dopan Fe_3O_4 dan CoFe_2O_4 . Dari data magnetisasi, Fe_3O_4 dan CoFe_2O_4 masing-masing memiliki ukuran rata-rata partikel 25 nm dan 46 nm dan bersifat superparamagnetik dan ferromagnetik. Variasi konsentrasi dopan yang digunakan adalah $\varphi_1 = 2$ wt%, $\varphi_2 = 5$ wt%, dan $\varphi_3 = 10$ wt%. Medan magnet menggunakan magnet permanen dengan nilai intensitas yang bervariasi antara 0-200 mT. Berkaitan dengan interaksi dipolar yang bergantung pada ukuran partikel, kami mengusulkan jumlah dopan maksimum 5 wt% untuk menghindari aglomerasi atau sedimentasi dari nanopartikel yang berdampak pada rendahnya stabilitas PCM pada kondisi liquid (Sutjahja dkk., 2024).

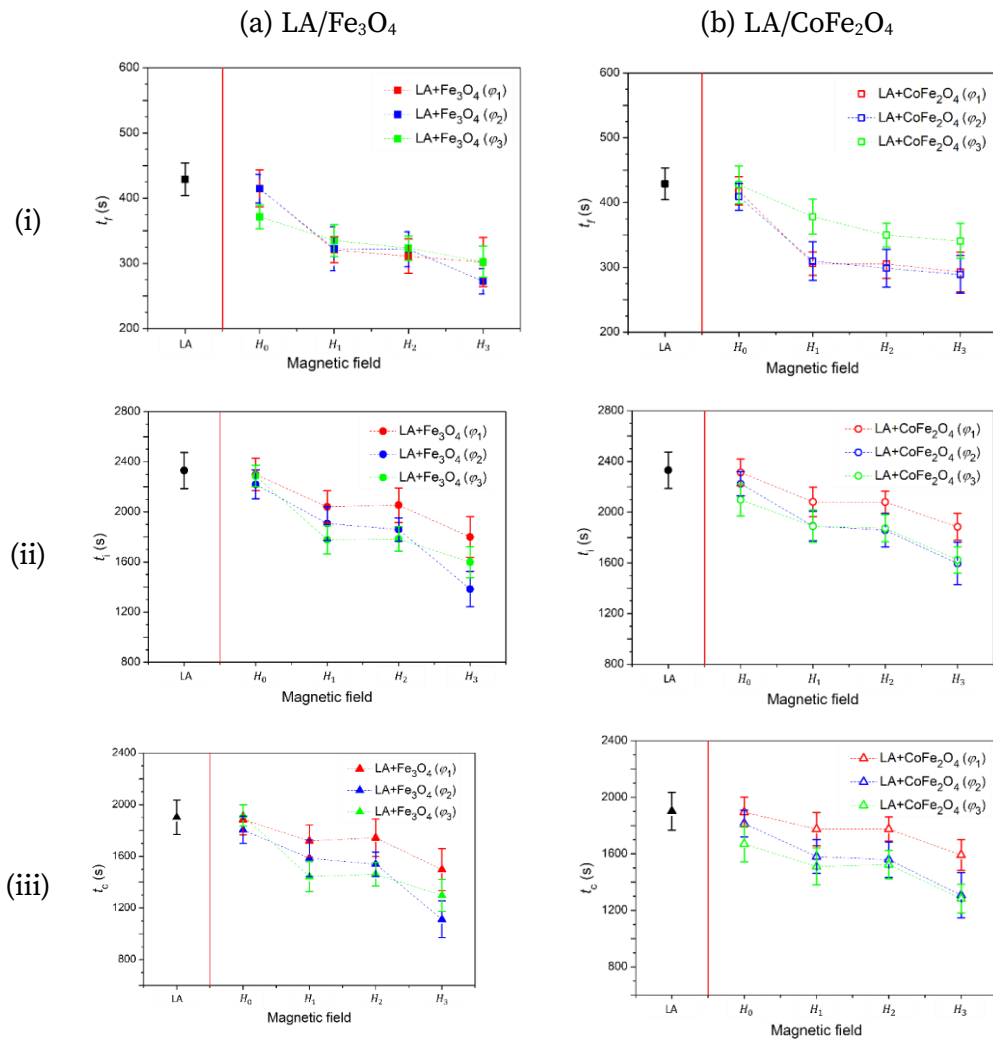
Hasil studi untuk pengaruh medan magnet pada ditunjukkan pada proses freezing dari LA dan komposit-magnetik LA ditunjukkan pada Gambar 4.9 (Anggraini dkk., 2024). Masing-masing grafik menunjukkan data tipikal untuk lepasan kalor sensibel pada fase liquid dengan perubahan suhu yang besar, lepasan kalor laten pada suhu yang relatif konstan, dan lepasan kalor sensibel pada fase solid dengan perubahan suhu yang lebih kecil dari fase liquid. Dari gambar ini jelas terlihat bahwa medan magnet memengaruhi proses

perubahan fasa, yaitu mempercepat nukleasi dan mempersependek fase lepasan kalor laten pada suhu konstan.



Gambar 4.9 (a) Profile temperatur terhadap waktu (garis tebal) dan turunannya (garis tipis) selama proses solidifikasi LA dan magneti-komposite LA dalam medan magnet yang berbeda. (b) Analisis parameter temperatur dan waktu karakteristik (Anggraini dkk., 2024)

Gambar 4.10 menunjukkan nilai rata-rata dan standar deviasi untuk masing-masing parameter karakteristik waktu *freezing* (t_f), waktu infleksi (t_i) yang menandai akhir dari periode solidifikasi, dan periode solidifikasi (t_c) yang ditentukan sebagai selisih antara t_i dan t_f . Dari gambar ini terlihat bahwa medan magnet secara umum memengaruhi parameter waktu solidifikasi dari LA dan komposit magnetik LA.



Gambar 4.10 Nilai rata-rata parameter waktu pembekuan vs intensitas medan magnet LA dan LA komposit magnetik untuk dopan (a) Fe₃O₄ dan (b) CoFe₂O₄, terdiri atas (i) t_f , (b) t_i , dan (c) t_c (Anggraini dkk., 2024).

Secara termodinamika pengaruh medan magnet terhadap proses solidifikasi dapat dijelaskan dengan perubahan energi bebas Gibbs dari sistem. Energi bebas Gibbs untuk pembentukan inti kristal berbentuk bola di bawah medan magnet dapat ditulis sebagai (Mullin, 2001) (Wang dkk., 2017):

$$\Delta G = \Delta G_s + \Delta G_v + \Delta G_H \quad (4.5)$$

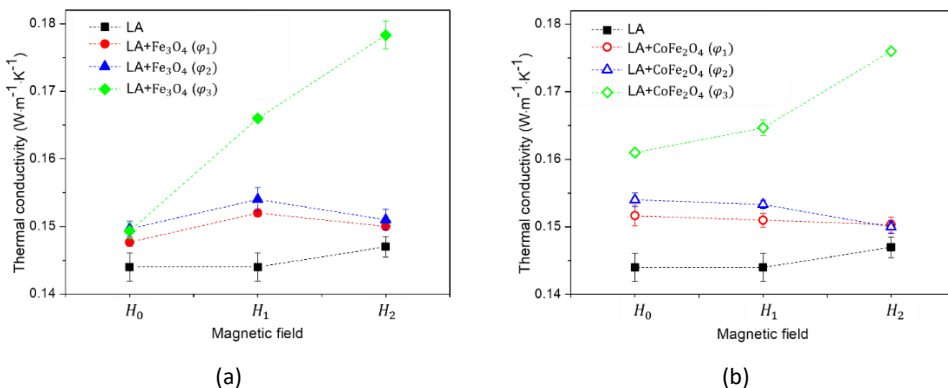
$$\Delta G_s = 4\pi r^2 \sigma \quad (4.6)$$

$$\Delta G_v = -\frac{\Delta H_f \Delta T_s}{T_f} \quad (4.7)$$

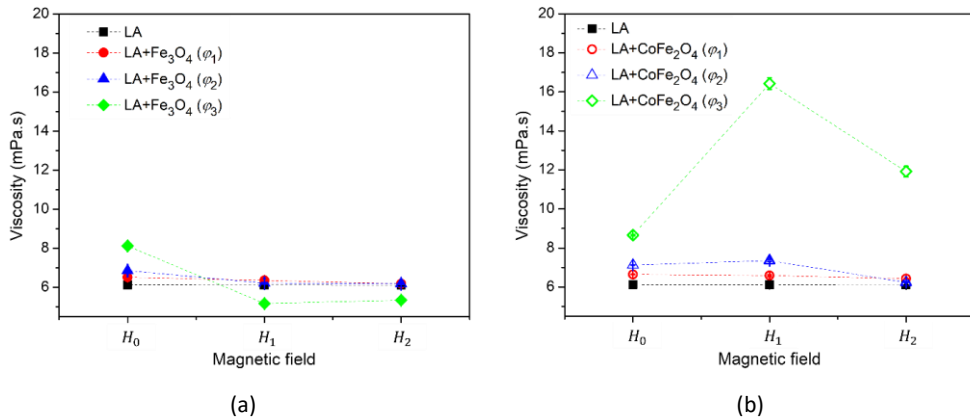
$$\Delta G_H = -\mu_0 \int_0^H (M^s - M^l) \Big|_{T=T_f} dH \quad (4.8)$$

dengan ΔG_s dan ΔG_v adalah kontribusi permukaan dan volume dari energi bebas Gibbs, dan ΔG_H adalah energi bebas Gibbs magnetik. Pada keempat persamaan di atas r , σ , ΔH_f , ΔT_s , μ_0 , M^s , and M^l adalah jari-jari bola kristalin, energi bebas permukaan dari antarmuka fluida kristal, entalpi *melting*, derajat *supercooling*, permeabilitas vakum, dan magnetisasi dari suspensi pada fase solid dan liquid. Dengan efek *supercooling* yang dapat diabaikan dari asam laurat, kontribusi medan magnet menjadi dominan. Selanjutnya dengan asumsi $M^s > M^l$, kontribusi volume dari energi bebas Gibbs bernilai negatif. Selanjutnya, radius kritis bagi pembentukan kristal dan energi bebas Gibbs kritis dapat diperoleh dengan minimisasi Persamaan (4.5). Seperti halnya peran medan listrik, peran dari medan magnet adalah untuk mengurangi radius kritis dan energi bebas Gibbs kritis dibandingkan dengan kasus tanpa medan magnet dan laju nukleasi yang lebih tinggi serta waktu induksi yang lebih rendah.

Analisis waktu karakteristik selama proses solidification tersebut dikaitkan dengan laju perpindahan kalor dan struktur rantai partikel. Dalam hal ini konduktivitas termal (Gambar 4.11) merupakan parameter yang penting dalam hubungannya dengan viskositas (Gambar 4.12). Dalam medan magnet yang nonhomogen, analisis gerak partikel melibatkan gaya magnetik, gaya hambat, dan gaya termal pada partikel.



Gambar 4.11 Kebergantungan medan magnet pada konduktivitas termal fase liquid ($T=55\text{ }^\circ\text{C}$) dari LA dan komposit magnetik (a) LA/ Fe_3O_4 dan (b) LA/ CoFe_2O_4 (Anggraini dkk., 2024)



Gambar 4.12 Kebergantungan medan magnet pada viskositas ($T = 55 \text{ }^\circ\text{C}$) dari LA dan komposit magnetik LA, untuk dopan berbeda: (a) Fe_3O_4 dan (b) CoFe_2O_4 (Anggraini dkk., 2024)

Secara umum konduktivitas termal dan viskositas dari komposit magnetik LA lebih tinggi daripada konduktivitas termal dan viskositas dari LA, dan meningkat dengan penambahan konsentrasi dopan. Pada konduktivitas tanpa medan magnet luar utk nilai kons dopan yg sama, konduktivitas termal dan viskositas dari komposit Fe_3O_4 lebih rendah daripada komp CoFe_2O_4 . Dalam medan magnet luar, konduktivitas termal dan visko menunjukkan variasi yang tidak monoton terhadap H , dan sangat bergantung pada konsentrasi dan jenis dopan. Secara umum variasi konduktivitas termal dan viskositas terhadap H menyiratkan adanya medan magnet kritis (*critical magnetic field*, CMF), di mana dari kondisi tanpa medan konduktivitas termal/viskositas meningkat dengan bertambahnya nilai H sampai nilai H tertentu (CMF), kemudian berkurang dengan peningkatan lebih lanjut dari H .

Berkaitan dengan ukuran rata-rata partikel yang kecil, jumlah partikel per satuan volume dalam sistem MNF menjadi besar. Nanopartikel magnetik dalam sistem ferrofluid atau MNF dapat dipandang sebagai dipol-dipol magnetik yang teragitasi termal dalam fluida mengalami gerak translasi dan rotasi Brownian. Tanpa medan magnet luar, momen magnet dipolar m terorientasi secara acak (*random*), dan fluida tidak memiliki nilai magnetisasi. Dengan penerapan medan magnet luar, momen-momen magnet dipolar akan terarah sebagian sesuai dengan arah medan magnet, sehingga menghasilkan magnetisasi total pada sistem MNF, di mana magnetisasi tersebut akan meningkat seiring dengan bertambahnya medan magnet.

Pada medan magnet nol (H_0), peran dopan dalam komposit magnetik LA memunculkan gaya hambat. Kehadiran dopan juga meningkatkan viskositas dan konduktivitas termal dari komposit-LA, sehingga meningkatkan laju perpindahan kalor yang sebanding dengan konsentrasi dopan. Untuk berbagai jenis dopan, ukuran partikel yang lebih besar menghasilkan viskositas yang lebih tinggi, yang pada gilirannya berkontribusi terhadap konduktivitas termal yang lebih tinggi (Mohanty, 1951). Namun ukuran partikel yang besar dapat menyebabkan rendahnya stabilitas suspensi. Dalam hal ini, ukuran partikel CoFe_2O_4 yang lebih besar dibandingkan dengan Fe_3O_4 sesuai dengan viskositas dan konduktivitas termal yang lebih tinggi dari komposit LA/ CoFe_2O_4 dibandingkan dengan komposit LA/ Fe_3O_4 . Analisis ini sesuai dengan hasil eksperimen yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 dan 4.11.

Pada medan magnet kecil di bawah CMF, gaya drag lebih dominan dibandingkan gaya magnet. Interaksi antarpartikel yang relatif besar di antara partikel-partikel yang termagnetisasi bertanggung jawab terhadap pembentukan struktur rantai. Lebih lanjut, struktur rantai yang stabil ini akan terarah sesuai dengan arah medan magnet sehingga menghasilkan kondisi yang menguntungkan bagi perpindahan kalor, yang ditandai dengan peningkatan konduktivitas termal. Dengan peningkatan konsentrasi dopan, jumlah dan kepadatan rantai meningkat, yang ditandai dengan peningkatan viskositas dan konduktivitas termal. Pada intensitas medan magnet yang lebih tinggi di atas CMF, gaya magnet yang bekerja pada nanopartikel melebihi gaya hambat, sehingga menyebabkan agregasi lateral (*zippering*) sebelum struktur anisotropik karena putusnya struktur rantai (Vinod dan Philip, 2022). Hal ini akan menurunkan laju perpindahan kalor yang ditunjukkan dengan berkurangnya konduktivitas termal dan viskositas.

Berkaitan dengan ukuran nanopartikel Fe_3O_4 yang lebih kecil dari CoFe_2O_4 , kekuatan interaksi antarpartikel Fe_3O_4 di bawah pengaruh medan magnet eksternal lebih besar yang mengarah pada peningkatan transpor termal efektif. Selain itu, kurva magnetisasi dari partikel Fe_3O_4 mengindikasikan sifat superparamagnetik yang identik dengan domain tunggal (Vinod dan Philip, 2022), sehingga pengaruh medan magnet lebih efektif. Analisis ini sesuai dengan hasil eksperimen yang menunjukkan konduktivitas termal komposit LA/ Fe_3O_4 yang lebih tinggi dibandingkan dengan komposit LA/ CoFe_2O_4 . Lebih lanjut, model yang diusulkan oleh Katiyar dkk. menunjukkan korelasi antara karakteristik magnetik dari dopan

dengan konduktivitas termal liquid dan viskositas dari suspensi. Secara khusus, magnetisasi saturasi dopan berkontribusi terhadap kekuatan rantai partikel, dan medan magnet yang diperlukan untuk mencapai keadaan saturasi ini berperan sebagai penghalang bagi pembentukan struktur rantai partikel. Dengan demikian magnetisasi saturasi yang lebih tinggi berkaitan dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi (Katiyar dkk., 2016b), sedangkan medan magnet saturasi yang lebih tinggi menghasilkan peningkatan viskositas dari suspensi (Katiyar dkk., 2015). Analisis ini konsisten dengan data yang diperoleh, yaitu konduktivitas termal yang lebih tinggi dari komposit LA/Fe₃O₄ dibandingkan komposit LA/CoFe₂O₄ karena magnetisasi saturasi Fe₃O₄ yang lebih tinggi dan viskositas komposit LA/CoFe₂O₄ yang lebih tinggi dibandingkan komposit LA/Fe₃O₄ berkaitan dengan medan magnet saturasi yang lebih tinggi dari CoFe₂O₄.

5 ARAH DAN LINGKUP PENGEMBANGAN

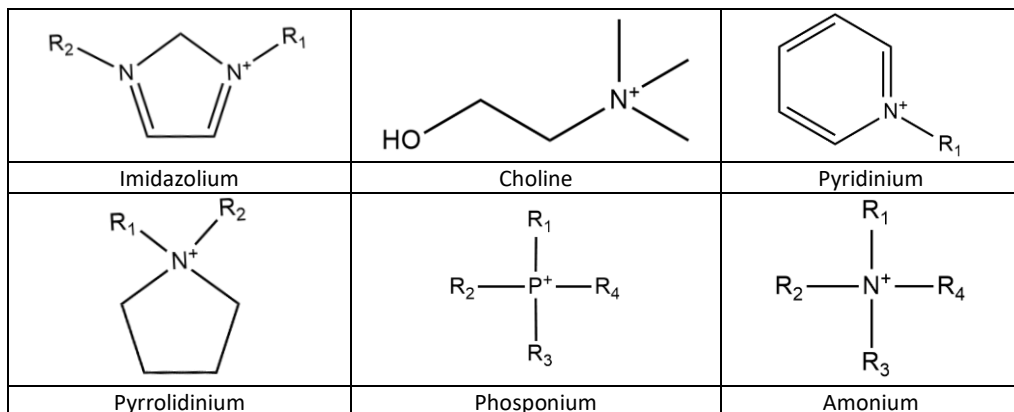
5.1 Pengembangan Material

Peningkatan kinerja PCM dimungkinkan dengan ukuran PCM yang semakin kecil dalam ukuran mikrometer atau nanometer dan dengan tambahan material pendukung (*supporting material*) bersifat porous dan berukuran nano (*nanoporous*), yang dikenal sebagai komposit PCM dengan bentuk stabil (*shape-stabilized composite PCM*, ssc-PCM) atau komposit perubahan fase (*phase change composite*, PCC) (Gao dkk., 2018). *Supporting material* tersebut bertujuan untuk meminimalisir efek-efek negatif dari PCM, terutama kebocoran pada fase liquid. *Supporting material* yang digunakan umumnya berbentuk aerogel, sponges, nanosheets atau nanoplatelets, dari material berbasis karbon seperti graphene, graphite, xpanded graphite, carbon nanotube (CNT), atau karbon yang dihasilkan dari biomassa (Li Y., Samad Y.A., Polychronopoulou K., Alhassan S.M., Liao K., 2014).

Dengan ukuran PCM dalam orde nanometer, dimungkinkan fenomena menarik yang tidak ditemui untuk ukuran PCM yang besar, di antaranya adalah efek pembatasan nano (*nanoconfinement*) yang memungkinkan konversi energi dengan efisiensi yang relatif tinggi, seperti konversi energi matahari menjadi termal, konversi energi matahari menjadi termoelektrik, konversi magnetik menjadi termal, konversi cahaya menjadi termal, dan konversi listrik menjadi kalor (Yuan dkk., 2019) (Li dkk., 2023) (Chen dkk., 2020). Sebagai contoh, Li dkk. (Li dkk., 2016) melaporkan bahwa PCC yang terdiri atas parafin dengan anisotropik graphene aerogels (AN-GA-parafin) menunjukkan efisiensi elektrotermal yang relatif tinggi hingga 85% dengan penerapan nilai tegangan yang relatif kecil (1–3 V). Dalam hal ini efisiensi penyimpanan energi didefinisikan sebagai rasio antara kalor laten yang tersimpan dan *input* energi listrik, dengan asumsi bahwa semua PCM berkontribusi pada proses perubahan fase (Chen dkk., 2012). Lebih lanjut, hasil eksperimen PCC tersebut menunjukkan bahwa medan listrik juga mengendalikan periode solidifikasi dan *melting* pada temperatur konstan.


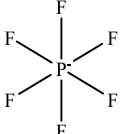
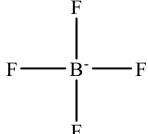
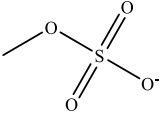
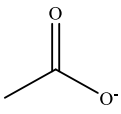
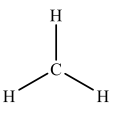
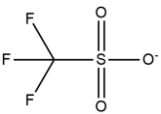
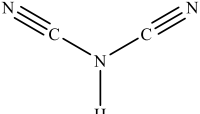
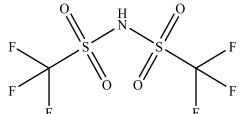
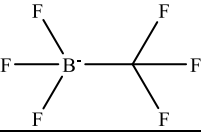
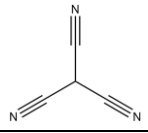
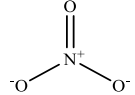
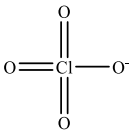
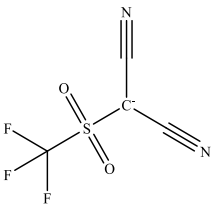
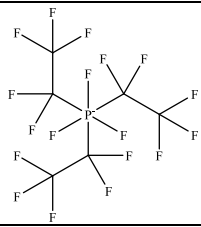
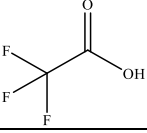
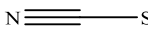
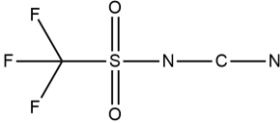
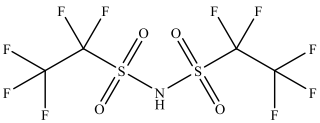
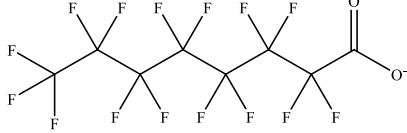
Beberapa waktu ini, penerapan cairan ionik (*ionic liquid*, IL) sebagai media penyimpanan energi termal semakin menarik perhatian karena sifat-sifat termofisiknya yang mendukung, seperti rentang temperatur perubahan fase yang cukup lebar, tidak mudah terbakar, volatilitas yang rendah, dan

stabilitas termal dan kimia yang baik, tekanan uap yang sangat rendah (Zhu dkk., 2009) (Mokhtarpour dkk., 2023). *Ionic liquid* adalah jenis garam yang terdiri atas kation organik dan anion organik atau anorganik dengan temperatur melting di bawah 100 °C (Lei dkk., 2017). IL telah cukup lama digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti pelarut ramah lingkungan (*green solvents*) dalam kimia organik, pemisah campuran azeotropik (*azeotropic mixture separation*), pemisahan gas (*gas separation*), praperlakuan biomassa, katalis berbagai reaksi, elektrolit dalam perangkat pembangkit/penyimpanan energi alternatif, dan penyerap gas CO₂ (Kaur dkk., 2022) (Sandip dkk., 2020). Desain struktur IL yang dapat disesuaikan sesuai dengan pemilihan jenis kation dan anion serta panjang rantai alkyl sangat berpengaruh pada sifat-sifat fisis dan kimiawi, serta memainkan peran penting dalam bidang penyimpanan energi (Jiang dkk., 2022). Selain itu perilaku yang beragam dan kompleks dari kristalisasinya juga menjadikan IL sebagai material masa depan untuk penyimpanan energi yang memanfaatkan perubahan fase (Beil dkk., 2021). Gambar 5.1 dan Gambar 5.2. memberikan ilustrasi struktur kimia beberapa kation dan anion yang umum digunakan sebagai IL.

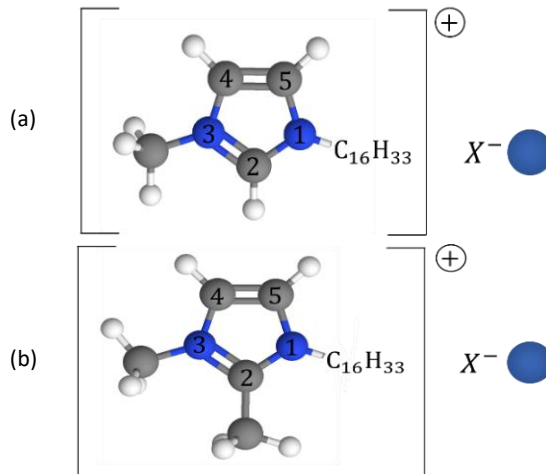


Gambar 5.1 Struktur kimia kation yang umum digunakan dalam IL, dengan R_n adalah grup alkyl

Di antara berbagai jenis IL, IL berbasis pada kation imidazolium adalah yang cukup banyak dipelajari karena stabilitasnya yang tinggi dan relatif mudah disintesis (Li dkk., 2023). Selain dipengaruhi oleh jenis anion (Panja S.K., 2020), sifat fisis dari IL berbasis kation imidazolium sangat dipengaruhi oleh substitusi grup methyl (-CH₃) pada posisi C2 dari kation imidazolium, yang dikenal sebagai proses metilasi (*methylation*) (Endo dkk., 2010), seperti ditunjukkan pada Gambar 5.3.

		
Halides: Bromide [Br], Chloride [Cl], Iodide [I], Fluoride [F]	Hexafluorophosphate, [PF ₆]	Tetrafluoroborate, [BF ₄]
		
Methylsulfate, [MeSO ₄]	Acetate, [Ac]	Methide, [Methide]
		
Triflate, [TfO]	Dicyanamide, [DCA]	Bis(trifluoromethylsulfonyl)imide, [Tf ₂ N]
		
Trifluoro(trifluoromethyl)borate, [CF ₃ BF ₃]	Tricyanomethane, [C(CN) ₃]	Nitrate, [NO ₃]
		
Perchlorate, [ClO ₄]	Dicyano((trifluoromethyl)sulfonyl)methanide, CF ₃ SO ₂ C(CN) ₂	Tris(pentafluoroethyl)trifluorophosphate, [eFAP]
		
Trifluoroacetic acid, [TfA]	Thiocyanate, [SCN]	2,2-trifluoromethylsulfonyl-N-cyanoamide, [TFSAM]
		
Bis(pentafluoroethyl)Sulfonylimide, [BETI]	Pentadecafluorooctanate, [C ₇ F ₁₅ CO ₂]	

Gambar 5.2 Struktur kimia anion yang umum digunakan dalam IL



Gambar 5.3 Struktur kimia dari IL: (a) $[C_{16}MIM]^+X^-$ dan (b) $[C_{16}MMIM]^+X^-$. Bola biru pada ring kation adalah atom nitrogen.

Di antara perubahan sifat fisis tersebut adalah seperti temperatur *melting*, temperatur dekomposisi, melting entalpi, viskositas, densitas, konduktivitas listrik, dan entropi (Endo dkk., 2010) (Haddad dkk., 2018). Hasil studi kami pada IL berbasis kation imidazolium menunjukkan bahwa jenis anion dan metilasi juga sangat memengaruhi konduktivitas termal (Anggraini dkk., 2022). Analisis data konduktivitas termal tersebut didasarkan pada sifat interaksi antara kation dan anion, yang berpengaruh terhadap ikatan hidrogen, interaksi Coulomb, dan gaya dispersi (Fumino dkk., 2014). Selain itu, konsentrasi tertentu dari dopan nanopartikel Al_2O_3 pada garam ionik berbasis kation tetrabutylammonium potensial untuk peningkatan *melting enthalpy* yang sangat penting untuk kinerjanya sebagai penyimpan energi termal (Sutjahja dkk., 2020).

5.2 Peningkatan Kinerja PCM melalui Medium Transfer Kalor

PCM sebagai medium dari *latent* TES dapat digunakan secara pasif atau aktif. Dalam skenario pasif, kalor disimpan dalam PCM dan dilepaskan secara alami. Di sisi lain, dalam skenario aktif, kalor disimpan dan/atau dilepaskan menggunakan pompa, kipas angin, atau *blower*. Baik secara pasif atau aktif, kinerja dari PCM tidak lepas dari pengembangan fluida transfer kalor (*heat transfer fluid*, HTF), yaitu medium untuk perpindahan kalor antara PCM dan lingkungan (Al-Yasiri dkk., 2021). PCM dan HTF menentukan efisiensi dari penyimpanan energi termal secara keseluruhan. Seperti halnya PCM (Yuan

dkk., 2019), salah satu faktor penting untuk performa maksimum dari HTF adalah laju transfer kalor yang tinggi yang menyangkut efisiensi perpindahan kalor, yang lazim diukur oleh parameter fisis konduktivitas termal. Beberapa jenis fluida yang lazim digunakan sebagai HTF konvensional adalah air, etilen glikol, minyak, dll.

Kinerja transfer kalor dari fluida konvensional dapat ditingkatkan dengan penambahan nanopartikel logam atau oksida logam, seperti Ag, Cu, Zn, CuO, ZnO, MgO, Al₂O₃, SiO₂, TiO₂, atau material berbasis karbon seperti grafit, graphene, atau carbon nanotube, yang berukuran antara 1 nm hingga 100 nm, yang dikenal sebagai sistem nanofluida (Timofeeva dkk., 2011) (Ahmadi dkk., 2018). Salah satu hal yang perlu diperhatikan dari nanofluida adalah stabilitasnya, yaitu agar tidak mudah mengalami sedimentasi atau aglomerasi. Stabilitas nanofluida dapat ditingkatkan dengan penggunaan surfaktan yang tepat (Wang dkk., 2023). Berdasarkan jenis surfaktan yang digunakan (ionik atau non-ionik), metode stabilisasi nanofluida menggunakan surfaktan dibagi menjadi 3, yaitu elektrostatik, sterik, dan elektrosterik (Chakraborty dan Panigrahi, 2020). Teori yang diusulkan oleh Derjaguin, Landau, Vewey, dan Overbeek (teori DLVO) berhasil memberikan penjelasan fisis untuk stabilitas yang baik dari nanofluida (Hernandez, 2023). Selain memengaruhi stabilitas nanofluida, sifat-sifat termofisis (stabilitas termal, viskositas, dan konduktivitas termal) dari NF sangat dipengaruhi oleh jenis surfaktan yang digunakan (Wang dkk., 2021).

Peningkatan konduktivitas termal dari nanofluida dimungkinkan dengan aplikasi medan listrik DC (Liu dkk., 2017). Hasil eksperimen yang dilakukan oleh Liu dkk. (Liu dkk., 2017) menunjukkan bahwa konduktivitas termal nanofluida meningkat secara monoton dengan bertambahnya medan listrik, dengan dengan rasio maksimum 160% dibandingkan dengan konduktivitas termal base fluid dengan tambahan nanopartikel Al₂O₃ dengan konsentrasi 1,5 wt.% dengan aplikasi medan listrik luar 1,2 MV/m. Mekanisme yang bertanggung jawab peningkatan konduktivitas termal melibatkan efek elektroforesis (*electrophoretic*) dan efek termoforesis (*thermophoretic*) dari nanoparticles. Kedua efek tersebut masing-masing berkaitan dengan transport partikel di bawah pengaruh gradien temperatur dan medan listrik non-homogen (Wang dkk., 2021).

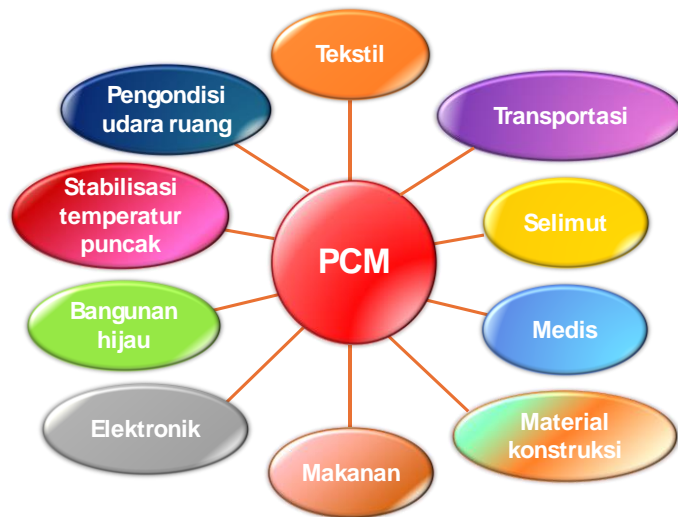
Pengembangan lebih lanjut dari nanofluida adalah sistem ferrofluida (FF) yang menggunakan dopan berbasis besi atau iron (Fe), seperti Fe_2O_3 atau Fe_3O_4 (Material Aspects of Ferrofluids, Editors: Pant dkk., 2023), atau dopan magnetik lain seperti nanopartikel Co, Ni, atau *spinel ferrites* MFe_2O_4 yang dikenal sebagai sistem nanofluida magnetik (*magnetic nanofluid*, MNF) (Bahiraei dan Hangi, 2015) (Hussain dkk., 2020) (Amiri dkk., 2019). Sifat-sifat fisis dan kinerja dari FF dan MNF sangat dipengaruhi oleh penerapan medan magnet luar. Hasil studi eksperimen menunjukkan bahwa konduktivitas termal dari MNF meningkat dengan peningkatan intensitas medan magnet luar sampai nilai medan magnet kritis (*critical magnetic field*, CMF), di mana konduktivitas termal berkurang untuk medan magnet yg lebih besar dari CMF (Katiyar dkk., 2016a) (Katiyar dkk., 2016b) (Altan dkk., 2011) (Karimi dkk., 2014). Mekanisme fisis yang melandasi peningkatan transfer kalor dari sistem FF dan MNF dalam medan magnet melibatkan teori perkolasi, yaitu pembentukan struktur rantai dari nanopartikel (Philip dkk., 2007) (Philip dkk., 2008).

Peningkatan konduktivitas termal dari sistem NF, FF atau MNF, baik tanpa atau dengan aplikasi medan listrik atau medan magnet luar masih cukup mengalami tantangan dan kendala dengan peningkatan viskositas dari suspensi sistem (Vinod dan Philip, 2022) (Doganay dkk., 2019). Selain memengaruhi konduktivitas termal, penambahan dopan pada HTF atau PCM juga akan memengaruhi viskositas, di mana viskositas yang tinggi akan mengurangi kepadatan daya sistem. Lebih lanjut, viskositas dari sistem FF atau MNF juga dipengaruhi oleh medan magnet, yang disebut efek *magnetoviscous* (Odenbach dan Thurm, 2002). Pemahaman yang baik dari transfer kalor pada sistem MNF sangat mendukung untuk berbagai aplikasinya (Philip, 2023).

5.3 PCM untuk Berbagai Aplikasi dengan Fokus pada Gedung

Aplikasi PCMs sebagai *latent TES* terkait erat dengan kemampuannya untuk menyerap atau melepaskan energi termal yang besar pada temperatur yang (relatif) konstan di sekitar temperatur transisi fase. Transisi fase yang lazim digunakan adalah padat menjadi cair (*melting*) atau sebaliknya (solidifikasi). Pada proses *melting* PCM menyerap energi termal dari lingkungan, sedangkan pada proses solidifikasi PCM melepaskan energi termal ke lingkungan.

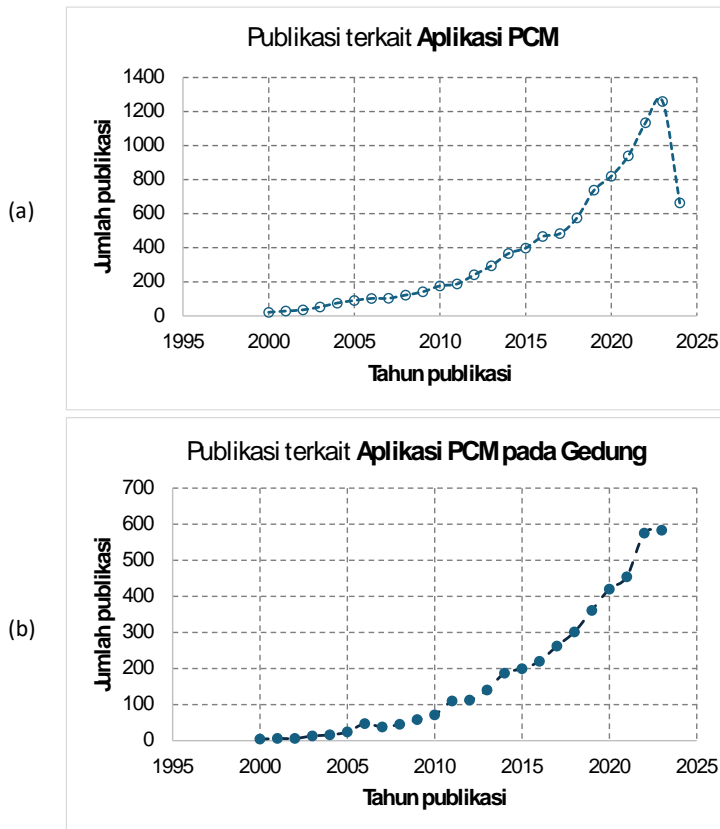
Berdasarkan karakteristik PCM tersebut, aplikasi PCM pada umumnya dapat dibagi menjadi dua, yaitu PCM sebagai bagian dari *temperature management systems* dan PCM sebagai *thermal energy storage systems* (Hyun D.C., Levinson N.S., Jeong U., Xia Y., 2014). Sebagai *temperature management systems*, aplikasi PCM meliputi fungsi pemanasan dan penyejuk ruangan pada gedung, mobil/ kendaraan, kotak penyimpanan selama pengiriman yang berisi makanan/obat-obatan, vaksin, jaringan biologis, atau binatang yang sensitif temperatur, dan juga *battery thermal management system* untuk stabilisasi temperatur *photovoltaic* (PV) untuk mempertahankan kinerjanya. Sebagai *thermal energy storage systems*, PCM digunakan dalam *solar energy applications* pada bangunan yang menyimpan energi kalor dari matahari untuk berbagai aplikasi rumah tangga, dan aplikasi biologis seperti *treatment* penyakit, *drug release system* (Hyun dkk., 2014) (Zare dan Mikkonen, 2023), dll.. Selain energi termal dari matahari, PCM juga dapat digunakan untuk menyimpan limbah kalor yang dihasilkan dari proses industri atau mesin (Li dkk., 2021). Gambar 5.4 memberikan ilustrasi berbagai aplikasi PCM.



Gambar 5.4 Berbagai bidang aplikasi dari PCM (Adaptasi dari Al-Yasiri dan Szabó, 2021).

Di antara berbagai aplikasi PCM, yang paling banyak adalah PCM untuk aplikasi pada gedung. Hal ini diilustrasikan pada Gambar 5.5 yang menunjukkan jumlah publikasi terindeks scopus dengan menggunakan kata kunci: (a) "PCM" dan "application" dan (b) "PCM" dan "*building*". Dari gambar tersebut terlihat bahwa jumlah publikasi PCM untuk berbagai aplikasi

meningkat cukup signifikan setiap tahun dan aplikasi PCM pada gedung mengambil porsi sekitar 50%.



Gambar 5.5 Jumlah publikasi yang diekstrak dari Scopus dengan kata kunci: (a) PCM dan application dan (b) PCM dan *building*.

Penerapan PCM pada gedung pada umumnya sebagai selubung bangunan (*building envelope - facade*) untuk menghambat aliran kalor dari luar ke dalam sehingga PCM pada selubung bangunan tersebut dapat mempertahankan temperatur udara sejuk di dalam ruangan pada siang hari (Durakovic, 2020) (Cai dkk., 2021). Penambahan PCM pada selubung bangunan memberikan efek penghangatan ruangan pada malam hari, sehingga dapat dikatakan PCM pada selubung bangunan merupakan *temperature management system* untuk bangunan. Namun demikian, penambahan PCM pada selubung bangunan menimbulkan catatan negatif pada efek pemanasan kawasan yang dikenal dengan fenomena pulau panas perkotaan atau *urban heat island* (UHI) (Wonorahardjo dkk., 2020). Oleh karena itu, penggunaan PCM dalam aplikasi selubung bangunan terutama di Indonesia masih membutuhkan banyak

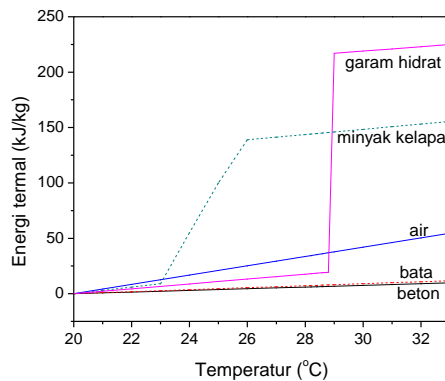
kajian manajemen temperatur agar tidak menimbulkan ketidaknyamanan termal pada malam hari serta intensitas UHI yang tinggi. Tantangan lain pada pengembangan teknologi PCM ini adalah popularitas penggunaan AC di masyarakat umum karena AC dinilai lebih praktis dan instan, walaupun saat ini sudah mulai banyak ditawarkan di pasaran produk AC PCM yang menerapkan prinsip TES. Produk-produk ini sangat potensial untuk dikembangkan di masa mendatang untuk efektivitas yang lebih baik dengan konsumsi listrik lebih rendah. Masa depan pengembangan teknologi manajemen temperatur dan teknologi penyimpanan kalor sangat luas mengingat dunia saat ini menghadapi krisis manajemen kalor skala global yang kita kenal dengan pemanasan global (*global warming*) dan juga pemanasan global (*local warming*) pada skala perkotaan.

Bekerja sama dengan Prodi Arsitektur dan Prodi Teknik Material ITB, kami mengembangkan aplikasi PCM sebagai tambahan masa termal internal (*internal thermal mass*, ITM). Teknologi baru ini dikembangkan sebagai pengendali temperatur di dalam ruangan melalui pengaturan komposisi *thermal mass* ruang yang menjadi kunci bagi kondisi termal ruang. Sejauh ini, di dunia umumnya hanya dikenal *envelope thermal mass* (ETM) yang berperan untuk menghambat dan menunda melalui teknik *storing* atau penyimpanan menggunakan PCM.

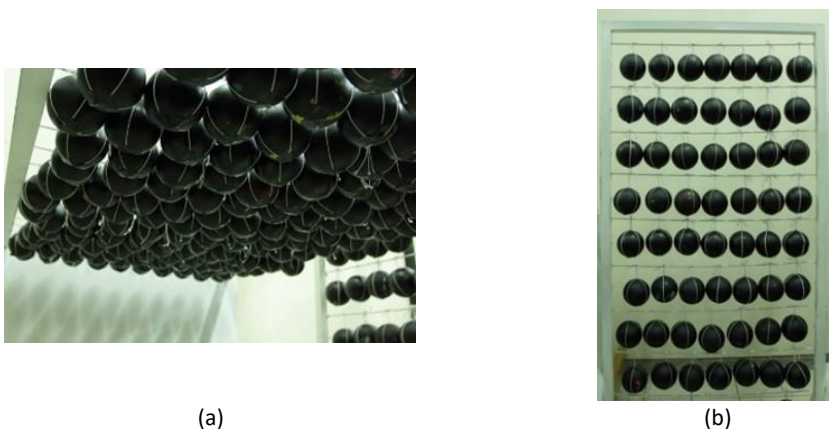
Untuk aplikasi ITM ini, berbagai kriteria dikembangkan untuk menentukan PCM yang tepat untuk aplikasi penyejukan udara ruang, terkait dengan integrasinya pada sistem bangunan, usia pakai, kemasan hingga efektivitasnya. Salah satu pertimbangan utama pemilihan jenis PCM adalah pada temperatur perubahan fasenya (*melting*). Untuk daerah tropis termasuk Indonesia, digunakan PCM yang memiliki nilai temperatur *melting* di sekitar zona nyaman manusia, yaitu sekitar 23–26 °C. Nilai *temperature melting* (T_m) ini dipenuhi oleh minyak kelapa. Minyak kelapa merupakan salah satu PCM organik yang secara ekonomi relatif murah dan mudah diperoleh di Indonesia, merupakan bahan menarik untuk diteliti aplikasinya. Selain minyak kelapa adalah garam hidrat $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ yang temperatur meltingnya sekitar 29 °C, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.6.

Penyejuk udara ruang berbasis minyak kelapa ini menggunakan sel-sel minyak kelapa berbentuk bola sebagai sistem penukar kalor pasif di dalam ruangan. Sel-sel disusun menjadi panil penukar kalor untuk dialiri udara

dalam proses penukaran kalornya, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.7. Kompleksitas pemanfaatan PCM sebagai penukaran kalor bergantung pada kondisi lingkungan yaitu profil temperatur harian (siang-malam) dan bulanan serta intensitasnya. Sehingga efektivitas teknologi ITM ini bergantung pada volume, jenis, dan komposisi PCM yang digunakan, agar proses penyimpanan dan pelepasan kalor berlangsung efektif dalam berbagai kondisi cuaca dan musim. Secara ideal pencairan /penyerapan kalor terjadi siang hari dan pembekuan/pelepasan kalor terjadi saat malam. Karakteristik material PCM memberikan proses yang berbeda untuk pencairan dan pembekuan baik dari aspek waktu yang dibutuhkan maupun intensitas perbedaan temperaturnya. Umumnya proses solidifikasi membutuhkan waktu yang lebih panjang dari rentang waktu malam yang ada sehingga proses pembekuan pada umumnya berlangsung tidak sempurna.

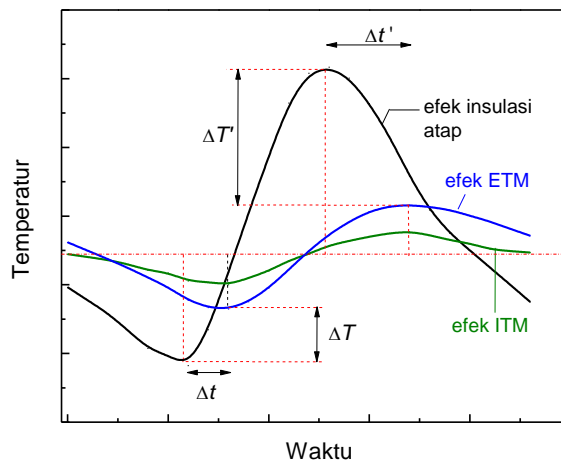


Gambar 5.6 Perbandingan kinerja penyimpanan kalor PCM minyak kelapa terhadap beton, bata, dan air pada rentang temperatur 20-32 °C.



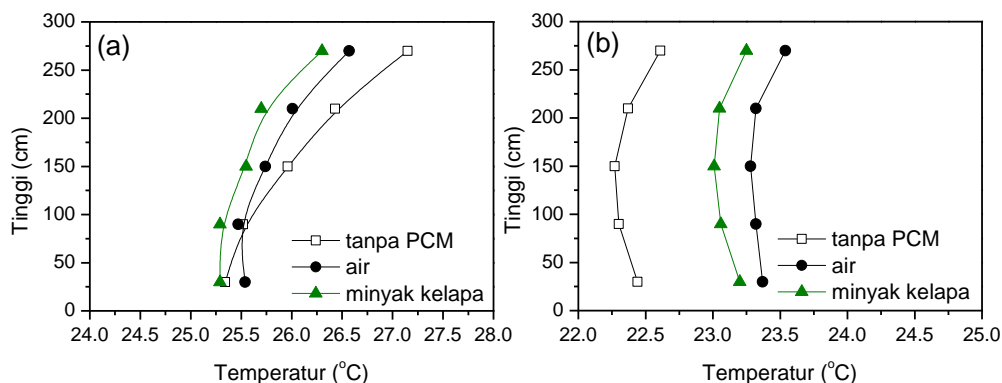
Gambar 5.7 Panil minyak kelapa yang dikonfigurasi secara (a) horizontal dan (b) vertikal (Wonorahardjo dkk., 2019)

Hasil studi eksperimen dan simulasi mengindikasikan penggunaan ITM PCM lebih efektif menurunkan temperatur maksimum udara pada siang hari dan dapat menutupi/mengkoreksi efek insulasi atap yang buruk, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.8 (Wonorahardjo dkk., 2019). Namun demikian, PCM ITM memberikan efek pemanasan pada malam hari yang berpotensi menimbulkan ketidaknyamanan pada musim dan cuaca tertentu.



Gambar 5.8 Formulasi peran dari ETM, ITM dan insulasi atap (Wonorahardjo dkk., 2019)

Dalam kajian awal kami, minyak kelapa dapat berfungsi sebagai pengendali temperatur udara ruangan untuk di atas 20 °C, meskipun kinerjanya hanya melibatkan sekitar 50% kemampuannya dalam menyerap atau melepaskan kalor. Hal ini disebabkan karena proses serapan kalor laten terjadi pada rentang temperatur 20–25 °C, sedangkan proses pelepasan kalor laten terjadi pada temperatur yang relatif rendah yaitu 16–18 °C. Dalam perhitungan kami, perkiraan massa minyak kelapa yang diperlukan untuk menurunkan temperatur udara maksimum sebesar 2,0–2,5 °C pada sore hari pada ruangan berukuran 3 × 4 m² adalah sebanyak 135–170 kg. Di sisi lain, kebutuhan temperatur lingkungan yang lebih rendah untuk lepasan kalor laten dari minyak kelapa, dapat diterapkan *outdoor night cooling* (Wonorahardjo dkk., 2018).



Gambar 5.9 Perbandingan antara kinerja air dan minyak kelapa sebagai tambahan massa termal internal, yang ditunjukkan dalam bentuk distribusi temperatur vertikal untuk kasus: a) siang hari dan b) malam hari (Wonorahardjo dkk., 2021).

Dari hasil studi yang lainnya, kinerja minyak kelapa sebagai ITM yang sudah menerapkan *outdoor night cooling* untuk pelepasan kalor *latent* PCM, lebih baik kinerjanya dibandingkan dengan air (Gambar 5.9) (Wonorahardjo dkk., 2021). Kajian komposisi *thermal mass* ruangan yang diintervensi dengan ITM minyak kelapa atau air pada lapisan udara atas, tengah dan bawah pada ruangan uji, menunjukkan temperatur udara 0,5 °C lebih rendah di dalam zona penghuni (tengah) sementara penurunan suhu lebih tinggi terjadi diamati pada lapisan atas.

Penerapan teknik *outdoor night cooling* dari PCM tergantung pada kondisi cuaca dan musim, berbeda dengan AC konvensional yang berkinerja tetap pada berbagai kondisi musim dan cuaca. Oleh karena ini, kajian sistem pasif ini (*passive cooling*) masih jauh dan menantang, sebagai contoh kajian pada berbagai ukuran sel PCM untuk memberikan respons yang berbeda-beda terhadap perubahan temperatur lingkungan, sehingga perannya sebagai penukar kalor dapat dirancang sesuai kebutuhannya. Aspek pentingnya untuk mengatur efektivitasnya adalah ukuran sel PCM yang dapat menunjukkan keseimbangan antara kapasitas serapan kalor (*charging*) dan lepasan kalor (*discharging*), demikian pula keseimbangan waktu antara serapan dan lepasan kalor.

6 PENUTUP

Buku ini membahas sistem penyimpan energi termal laten (*latent thermal energy storage*) berbasis material berubah fase (*phase change material*, PCM) melalui proses perubahan fase solid menjadi liquid (melting) atau sebaliknya (solidifikasi). Untuk kinerja optimum dari PCM, dilakukan upaya untuk pengendalian efek supercooling dan laju transfer kalor. Secara umum upaya tersebut dibagi menjadi 2 metode, yaitu pasif dan aktif. Sebagai penerapan cara pasif dibahas aplikasi dari agen nukleator pada PCM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (CaNT) dan dopan kimiawi pada PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (CaClH). Di sisi lain, sebagai penerapan cara aktif dibahas aplikasi medan listrik internal pada PCM CaClH serta dopan magnetik dan medan magnetik pada PCM asam laurat. Dibahas pula potensi aplikasi PCM minyak kelapa sebagai massa termal internal (*internal thermal mass*, ITM) untuk pengondisian udara ruang, yang dapat menggantikan peran AC konvensional.

Potensi pengembangan PCM masih terbentang lebar terutama untuk negara tropis kepulauan seperti Indonesia. Selain pengembangan material baru termasuk eksplorasi bahan alam, pengembangan PCM tidak lepas dari pemahaman yang baik dari sains Fisika, keilmuan material, dan pengembangan teknologinya. Untuk itu diperlukan kerja sama yang baik antardisiplin ilmu, di mana eksperimen dan komputasi atau simulasi saling mendukung satu sama lain. Selain itu kerja sama antara bidang ilmu sains dan teknologi akan mempercepat optimalisasi hulu-hilir, dalam rangka pencapaian keberlanjutan (sustainability) dan konservasi energi dan lingkungan.

7 UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Allah Yang Maha Pengasih dan Penyayang atas rahmat yang telah diberikan kepada kami untuk perolehan amanah Guru Besar di Institut Teknologi Bandung pada bidang Fisika Material Termal. Semoga amanah besar ini dapat kami jalankan dengan baik dan penuh tanggung jawab, Amin.

Perkenankan penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada yang terhormat: Pimpinan/Rektorat ITB, Senat ITB, Forum Guru Besar ITB, Dekanat FMIPA ITB (Bapak Dekan Prof. Ir. Wahyu Srigutomo, S.Si., M.Si., Ph.D.; Ibu WDS Dr. Hanni Garminia Y., S.Si., M.Si.; Bapak WDA Prof. Dr. Rukman Hertadi, S.Si., M.Si.), Senat FMIPA ITB (Bpk. Prof. Akhmaloka Ph.D. dan Bpk. Prof. Dr. Pepen Arifin), Kaprodi Fisika, dan ketua KK FMF FMIPA ITB (Bpk. Prof. Drs. Alexander Agustinus P. Iskandar, Ph.D.).

Terima kasih kepada para Guru Besar yang telah berkenan memberikan rekomendasi: Bpk. Prof. Müslüm Arıcı (Kocaeli University), Bpk. Prof. Darminto (ITS), Ibu Prof. Tati Subahar (SITH ITB), Bpk. Prof. Taufiq Hidayat (AS ITB), Bpk. Prof. Dr. Toto Winata, Bpk. Prof. Agung Nugroho dan Bpk. Prof. Wahyu Srigutomo. Terima kasih juga kepada para Senior Guru kami yang telah memperkenalkan kami dalam dunia Fisika: Bpk. Prof. Tjia May On (alm), Bpk. Prof. Barmawi (alm), Bpk. Prof. Panthur Silaban (alm), Bpk. Dr. Tan Ik Gie (alm). Dosen pembimbing kami S1: Bpk. Prof. Freddy Zen (Fisika FMIPA ITB), S2/S3: Bpk. Prof. Jaap Franse dan Bpk. Dr. Alois Menovsky (UvA), Bpk. Prof. Tjia May On (alm) dan Prof. Waloeyo Loeksmanto (alm). Para Guru Besar dan semua dosen Fisika ITB yang tidak dapat kami sebutkan namanya satu per satu, terima kasih baik sebagai dosen saat saya dulu belajar sebagai mahasiswa Fisika ITB dan saat ini sebagai rekan kerja. Terima kasih kepada seluruh anggota KK Fisika Magnetik dan Fotonik (FMF) FMIPA ITB, terutama Bpk. Dr. Daniel Kurnia yang banyak membantu instrumentasi alat. Terima kasih kepada Guru Besar dan dosen di lingkungan FMIPA ITB. Staf Tendik FMIPA/Fisika ITB, terutama Ibu Yunita Fatmawati, Bpk. Dei Mahmud, S.T., dan Bpk. Dedi Sudrajat.

Terima kasih kepada para kolaborator penelitian: Bpk. Prof. Müslüm Arıcı (Kocaeli University), Ibu Dr.rer.nat. Mardiyati, S.Si., MT., Bpk. Dr. Steven, S.T, M.T. (Teknik Material FTMD ITB), Ibu Prof. Surjani

Wonorahardjo (UM). Teman belajar S1, S2 & S3: Bpk. Prof. Markus, M.Si. (UM). Terima kasih atas kerja sama yang baik kepada para mahasiswa bimbingan, baik yang sudah lulus maupun yang masih aktif sebagai mahasiswa di ITB, khususnya kepada Dr. Yunita Anggraini dan Sdr. Akhmad Yusuf S.Si., M.Si. (FI-ITB).

Terima kasih juga kepada keluarga Oikumene ITB, Lingkungan 29A St. Raphael khususnya Bpk. Kuntarto, Ibu Dr. Jalina Widjaja, S.Si., M.Si., Ibu Ida dan Bpk. Yerry yang telah menjadi tetangga rumah dan teman baik, dan rekan-rekan Fisika-92 ITB atas hiburannya dan sebagai teman tumbuh bersama.

Kami persembahkan pencapaian ini untuk kedua orang tua saya, ayahanda Bpk. Harry Subur Sutjahja (alm) dan ibunda Ibu Hilda Handayani (alm) yang telah menjadi teladan sebagai orang tua dan curahan cinta kasih sejati bagi kami. Terima kasih telah memberikan kami kesempatan meraih mimpi di ITB dengan kuliah di jurusan Fisika saat diterima sebagai mahasiswa S1 ITB di tahun 1992. Filosofi hidup kerja keras, rendah hati, sederhana, dan konsisten atas pilihan hidup mewarnai hari-hari bertumbuhnya kami hingga hari ini. Kedua orang tua mertua: Bpk. Budi Sarwono (alm.) dan Ibu Ratnatiningsih (almh.) yang senantiasa menjadi pendidik sejati.

Terima kasih atas persaudaraan dan cinta kasih sejati yang tercurah pada kami sampai hari ini kepada semua saudara kandung kami: kakak saya Bpk. David Iman Sutjahja S.T. dan Ibu Diana Nuraini, S.Pd., Ibu Cynthia Christiana Sutjahja, S.E. dan Bpk. Sukardi, S.Kom., dan adik saya Bpk. Paulus Iman Sutjahja, S.Kom., M.Kom. dan Ibu Liliana Hardi (Ochi). Terima kasih juga kami sampaikan kepada keluarga besar Sutjahja (Oom Eddy K. Umbas dan Tante Lany Umbas, Tante Liesye, Tante Odet) dan keluarga besar Souw (Tante Yakob, Oom Wawa dan Tante Acu) beserta segenap sepupu dan keponakan yang tak dapat kami sebutkan satu per satu. Terima kasih kepada Tante Dr. Gita Andrajani Nataatmaja, S.U. (alm), beserta semua paman dan bibi keluarga Wonorahardjo yang mewarnai hari-hari kami di masa lalu. Kakak dan adik ipar dari suami: Bpk. dr. Surjanto Wonorahardjo, Ibu Prof. Surjani Wonorahardjo, dan Ibu Surjandari Wonorahardjo, beserta pasangan suami/istri masing-masing.

Pencapaian ini tidak mungkin kami peroleh tanpa dukungan dan kasih sayang suami tercinta, Prof. Dr. Surjamanto Wonorahardjo, serta ketiga anak

kami tersayang Sannia Josephine, Sandia Jonathan, Sanferis Johanesa yang setia mendampingi belajar dan mendukung kami. Tak sedikit pengorbanan yang diberikan oleh putra/i kami terutama dalam mentoleransi kesibukan kami siang dan malam, bahkan di hari libur.

Akhir kata, tiada gading yang tak retak. Kami mohon maaf yang sebesar-besarnya atas segala kekurangan dan ketidaksempurnaan selama perjalanan kami hingga saat ini. Kami sangat bersyukur kepada Allah Bapa atas berkat melimpah yang selalu tercurah pada kami, termasuk waktu dan kesempatan kami untuk hidup dan berkarya. Demikian saya sampaikan, dengan segala kerendahan hati semoga buku ini bermanfaat bagi kita semua.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbass K., Qasim M.Z., Song H. et al. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environ Sci Pollut Res*, 29, 42539–42559.
- Ahmadi M.H., Mirlohi A., Alhuyi Nazari M. & Ghasempour R. (2018). A review of thermal conductivity of various nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*, 265, 181–188.
- Akbarzadeh A., Samiei M., Davaran S. (2012). Magnetic nanoparticles: preparation, physical properties, and applications in biomedicine. *Nanoscale Research Letters*, 7, 144.
- Alexander L.F. and Radacsi N. (2019). Application of electric fields for controlling crystallization. *CrystEngComm*, 21, 5014–5031.
- Ali H.M., Rehman T.-ur, Arıcı M., Said Z., Duraković B., Mohammed H.I., Kumar R., Rathod M.K., Buyukdagli O., Teggari M. (2024). Advances in thermal energy storage: Fundamentals and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 100, 101109.
- Altan C.L., Elkatmis A., Yüksel M., Aslan N., Bucak S. (2011). Enhancement of thermal conductivity upon application of magnetic field to Fe₃O₄ nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 110, 093917.
- Al-Yasiri Q. dan Szabó M. (2021). Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: A comprehensive analysis. *Journal of Building Engineering*, 36, 102122.
- Amiri M., Salavati-Niasari M., Akbari A. (2019). Magnetic nanocarriers: Evolution of spinel ferrites for medical applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 265, 29–44.
- Anggraini Y., Yusuf A., Viridi S., Kurnia D., Wonorahardjo S., Sutjahja I.M. (2024). Magnetic Dopant and Field Effects on the Heat Discharge of Organic PCM based Lauric Acid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 152, 111105.
- Anggraini Y., Yusuf A., Wonorahardjo S., Kurnia D., Viridi S., Sutjahja I.M. (2022). Role of C2 methylation and anion type on the physicochemical and thermal properties of imidazolium-based ionic liquids. *Arabian Journal of Chem*, 15(8), 103963.
- Babar H., Ali H.M. (2019). Towards hybrid nanofluids: preparation, thermophysical properties, applications, and challenges. *J. Mol. Liq.*, 281, 598–633.

- Bahiraei M., Hangi M. (2015). Flow and heat transfer characteristics of magnetic nanofluids: A review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 374, 125-138.
- Beaupere N., Soupremanien U., Zalewski L. (2018). Nucleation triggering methods in supercooled phase change materials (PCM), a review. *Thermochimica Acta*, 670, 184-201.
- Beil S., Markiewicz M., Pereira C.S., Stepnowski P., Thöming J., Stolte S. (2021). Toward the proactive design of sustainable chemicals: ionic liquids as a prime example. *Chem. Rev.*, 121(21), 13132–13173.
- Bhatnagar A.S., Prasanth Kumar P.K., Hemavathy J., Gopala Krishna A.G. (2009). Fatty Acid Composition, Oxidative Stability, and Radical Scavenging Activity of Vegetable Oil Blends with Coconut Oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 86(10), 991-999.
- Bruno F., Belusko M., Liu M., Tay N.H.S. (2015). Using solid-liquid phase change materials (PCMs) in thermal energy storage systems.
- Butter K., Bomans P.H.H., Frederik P.M., Vroege G.J., Philipse A.P. (2003). Direct observation of dipolar chains in iron ferrofluids by cryogenic electron microscopy. *Nat. Mater.*, 2, 88–91.
- Cai R., Sun Z., Yu H., Meng E., Wang J., Dai M. (2021). Review on optimization of phase change parameters in phase change material building envelopes. *Journal of Building Engineering*, 35, 101979.
- Cengel Y.A. (2002). Heat Transfer, A Practical Approach, 2nd ed.
- Chakraborty S. & Panigrahi P.K. (2020). Stability of nanofluid: A review. *Applied Thermal Engineering*. 174.
- Chen L., Zou R., Xia W., Liu Z., Shang Y., Zhu J., Wang Y., Lin J., Xia D., Cao A. (2012). Electro- and Photo-Driven Phase Change Composites Based on Wax- Infiltrated Carbon Nanotube Sponges Supporting Information. *ACS Nano*, 6, 10884–10892.
- Chen X., Tang Z., Gao H., Chen S., Wang G. (2020). Phase Change Materials for Electro- Thermal Conversion and Storage: From Fundamental Understanding to Engineering Design. *iScience*, 23(6), 101208.
- Cong L., Zou B., Palacios A., Navarro M.E., Qiao G., Ding Y. (2022). Thickening and gelling agents for formulation of thermal energy storage materials – A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111906.
- De Villiers J.P.R. (1971). Crystal structures of aragonite, strontianite, and witherite. *Am. Mineral*, 56, 758-767.
- Dincer I. dan Ezan M.A. (2018). *Heat Storage: A Unique Solution For Energy Systems*. Springer Cam.

- Dincer I. dan Rosen M. (2010). *Energy Storage System and Applications*. Ontario Canada: John Wiley and Sons.
- Dinçer I. dan Rosen M.A. (2011). *Thermal Energy Storage Systems and Applications, Second Edition*. John Wiley and Sons.
- Dinçer I. dan Zamfirescu I.C. (2011). *Sustainable Energy Systems and Applications*. Springer.
- Doganay S., Alsangur R., Turgut A. (2019). Effect of external magnetic field on thermal conductivity and viscosity of magnetic nanofluids: a review. *Mater. Res. Express*, 6, 112003.
- Duffey R.B. dan Dincer I. (2010). Global Warming – Where Is the Cure? In *Global Warming: Green Energy and Technology Ibrahim Dincer, Adnan Midilli, Arif Hepbasli, T. Hikmet Karakoc (Editors)*. Springer.
- Duraković B. (2020). PCM-Based Building Envelope Systems: Innovative Energy Solutions for Passive Design.
- Endo T., Kato T., Nishikawa K. (2010). Effects of methylation at the 2 position of the cation ring on phase behaviors and conformational structures of imidazolium-based ionic liquids. *J. Phys. Chem. B*, 114, 9201–9208.
- Farghali M., Osman A.I., Mohamed I.M.A., Chen Z., Chen L., Ihara I., Yap P.S., Rooney D.W. (2023). Strategies to save energy in the context of the energy crisis: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21, 2003–2039.
- Fleischer A.S. (2015). Thermal energy storage using phase change materials: Fundamentals and applications.
- Fumino K., Reimann S., Ludwig R. (2014). Probing molecular interaction in ionic liquids by low frequency spectroscopy: Coulomb energy, hydrogen bonding and dispersion forces. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16, 21903–21929.
- Gao H., Wang J., Chen X., Wang G., Huang X., Li A., Dong W. (2018). Nanoconfinement effects on thermal properties of nanoporous shape-stabilized composite PCMs: A review. *Nano Energy*, 53, 769–797.
- Glicksman M.E. (2011). Principles of Solidification: An Introduction to Modern Casting and Crystal Growth Concepts. *Springer*.
- Haddad B., Kiefer J., Brahim H., Belarbi E. habib, Villemin D., Bresson S., Abbas O., Rahmouni M., Paolone A., Palumbo O. (2018). Effects of C(2) methylation on thermal behavior and interionic interactions in imidazolium-based ionic liquids with.
- Hattori T., Iwadate Y., Igarashi K., Kawamura K., and Mochinaga J. (1986). Thermal characteristics of molten calcium nitrate tetrahydrate. *Denki Kagaku oyobi Kogyo Butsuri Kagaku*, 54(9), 804-805.

- Hernández V.A. (2023). An overview of surface forces and the DLVO theory. *ChemTexts*, 9(10).
- Honcová P., Sádovská G., Binder L., Košťál P., Honc D. (2020). Calorimetric examination of suitability of calcium, cobalt and nickel nitrate hydrates for thermal energy storage. *J Therm Anal Calorim.*, 142, 275-87.
- Hong H., Kim S.K., Kim Y.-S. (2004). Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials. *International Journal of Refrigeration*, 27, 360–366.
<https://thermtest.com/the-ultimate-guide-to-heat-transfer-fluids>
- Hussain T., Javed M.T., Ansari R.I. (2020). A Review on Heat Transfer Enhancement Using Magnetic Nanofluids. *Nanoscience & Nanotechnology-Asia*, 10(3), 266 – 278.
- Hyun D.C., Levinson N.S., Jeong U., Xia Y. (2014). Emerging applications of phase-change materials (PCMs): Teaching an old dog new tricks. *Angew. Chemie - Int. Ed.*, 53(15), 3780–3795.
- Ibáñez M., Dieball C., Lasanta A., Godec A., & Rica R.A. (2024). Heating and cooling are fundamentally asymmetric and evolve along distinct pathways. *Nature Physics*, 20(1), 135–141.
International Energy Outlook 2023. Retrieved from <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>
- Jiang W., Li X., Gao G., Wu F., Luo C., Zhang L. (2022). Advances in applications of ionic liquids for phase change CO₂ capture. *Chem. Eng. J.*, 445, 136767.
- Joshi A.S., Dincer I. dan Reddy B.V. (2010). Role of Renewable Energy in Sustainable Development. In *Global Warming: Green Energy and Technology Ibrahim Dincer, Adnan Midilli, Arif Hepbasli, T. Hikmet Karakoc (Editors)*. Springer.
- Karimi A., Afghahi S.S.S., Shariatmadar H., Ashjaee M. (2014). Experimental investigation on thermal conductivity of MFe₂O₄ (M = Fe and Co) magnetic nanofluids under influence of magnetic field. *Thermochim. Acta*, 598, 59–67.
- Katiyar A., Dhar P., Das S.K., Nandi T. (2015). Near-field magnetostatics and Néel- Brownian interactions mediated magneto-rheological characteristics of highly stable nano-ferrocolloids. *Soft Matter*, 11, 1614-1627.
- Katiyar A., Dhar P., Nandi T., Das S.K. (2016a). Enhanced heat conduction characteristics of Fe, Ni and Co Nanofluids Influenced by Magnetic Field. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 78, 345–353.

- Katiyar A., Dhar P., Nandi T., Das S.K. (2016b). Magnetic field induced augmented thermal conduction phenomenon in magneto-nanocolloids. *J. Magn. Magn. Mater.*, 419, 588–599.
- Kaur G., Kumar H., Singla M. (2022). Diverse applications of ionic liquids: A comprehensive review. *Journal of Molecular Liquids*, 351, 118556.
- Kenisarin M. dan Mahkamov K. (2016). Salt hydrates as latent heat storage materials: thermophysical properties and costs. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 145, 255–286.
- Khan I., Saeed K., Khan I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 908-931.
- Khan Z., Khan Z., Ghafoor A. (2016). A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility. *Energy Conversion and Management*, 115, 132–158.
- Kordas G. (2023). Nanocontainers for Energy Storage and Conversion Applications: A Mini-Review. *Nanomanufacturing*, 3(3), 356-380.
- Kotz M., Kuik F., Lis E., Nickel C. (2024). Global warming and heat extremes to enhance inflationary pressures. *Communications Earth & Environment*, 5, 116.
- Kreith F., Manglik R.M., Bohn M.S., . (2011). Principles of heat transfer, Stanford: Cengage Learning.
- Lane G. A., dan Shamsundar N. (1983). Solar Heat Storage: Latent Heat Materials, Vol. I: Background and Scientific Principles. *Journal of Solar Energy Engineering*.
- Lane G.A. (1991). Phase change materials for energy storage nucleation to prevent supercooling. *Solar Energy Materials and Solar Cell*, 27(2), 135-60.
- Lane G.A. (2018). Solar Heat Storage : Latent Heat Materials Volume II, first ed.
- Lei Z., Chen B., Koo Y.-M., MacFarlane D.R. . (2017). Introduction: Ionic Liquids. *Chem. Rev.*, 117(10), 6633–6635.
- Li G., Zhang X., Wang J., Fang J. (2016). From anisotropic graphene aerogels to electron and photo-driven phase change composites. *J. Mater. Chem. A Mater. energy Sustain.*, 4, 17042–17049.
- Li Q., Wang S., Zhou M., Lu X., Qiao G., Li C., Wu Y. (2023). A review of imidazolium ionic liquid-based phase change materials for low and medium temperatures thermal energy storage and their applications. *Green Energy and Resources*, 1, 100010.

- Li Y., Samad Y.A., Polychronopoulou K., Alhassan S.M., Liao K. (2014). From biomass to high performance solar–thermal and electric–thermal energy conversion and storage materials. *J. Mater. Chem. A*, 2, 7759-7765.
- Li Z., Lu Y., Huang R., Chang J., Yu X., Jiang R., Yu X., Roskilly A.P. . (2021). Applications and technological challenges for heat recovery, storage and utilisation with latent thermal energy storage. *Applied Energy*, 283, 11627.
- Li Z.R., Hu N., Fan L.W. (2023). Nanocomposite phase change materials for high-performance thermal energy storage: A critical review. *Energy Storage Materials Volume*, 55, 727-753.
- Liu J.M., Liu Z.H., Chen Y.J. (2017). Experiment and calculation of the thermal conductivity of nanofluid under electric field. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 107, 6–12.
- Marín J.M., Zalba B., Cabeza L.F., Mehling H. (2003). Determination of enthalpy–temperature curves of phase change materials with the temperature-history method: improvement to temperature dependent properties. *Meas. Sci. Technol.*, 14, 184–189.
- Maris H.J. (2006). Introduction to the physics of nucleation. *C. R. Physique*, 7, 946-958.
- Material Aspects of Ferrofluids* (Editors: R.P. Pant, Vidya Nand Singh, Komal Jain, Arvind Gautam). (2023). CRC Press.
- Mehling H. dan Cabeza L.F. (2008). *Heat and Cold Storage with PCM An Up to Date Introduction Into Basics and Applications*. Berlin, Germany: Springer.
- Mohanty S.R. (1951). A relationship between heat conductivity and viscosity of liquids. *Nature*, 168, 42.
- Mokhtarpour M., Rostami A., Shekaari H., Zarghami A., Faraji S. (2023). Novel protic ionic liquids-based phase change materials for high performance thermal energy storage systems. *Scientific Reports*, 13:, 18936.
- Mullin J.W. (2001). *Crystallization. 4th ed.* Woburn, MA: Reed Educational and Professional Publishing Ltd.
- Myerson A.S. (2015). Concluding remarks. *Faraday Discuss.*, 179, 543–547.
- Nishad S. dan Krupa I. (2022). Phase change materials for thermal energy storage applications in greenhouses: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52(PC), 102241.

- Odenbach S. dan Thurm S. (2002). Magnetoviscous Effects in Ferrofluids. In *Ferrofluids: Magnetically Controllable Fluids and Their Applications* (editor: Stefan Odenbach). Springer.
- Osman A.I., Chen L., Yang M., Msigwa G., Farghali M., Fawzy S., Rooney D.W., Yap P.S. (2023). Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21, 741-764.
- Panja S.K. (2020). Influence of anion on physical and electronic property of imidazolium ionic liquids: role of weak interactions. *Chemistry Select*, 5, 2805–2809.
- Philip J. (2023). Magnetic nanofluids (Ferrofluids): Recent advances, applications, challenges, and future directions. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 311, 102810.
- Philip J., Shima P.D., Raj B. (2007). Enhancement of thermal conductivity in magnetite based nanofluid due to chainlike structures. *Appl. Phys. Lett.*, 91, 203108.
- Philip J., Shima P.D., Raj B. (2008). Evidence for enhanced thermal conduction through percolating structures in nanofluids. *Nanotechnology*, 19.
- Purohit B.K., Sistla V.S. (2020). Inorganic salt hydrate for thermal energy storage application: a review. *Energy Storage*, 1–26. doi:<https://doi.org/10.1002/est2.212>
- Putri R.A., Yusuf A., Rahman A., Anggraini Y., Kurnia D., Wonorahardjo S., Wonorahardjo S., Sutjahja I.M. (2021). Reduction of the supercooling of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ using electric field and nucleating agent effects. *Journal of Energy Storage*, 42.
- Quantifying the Impact of Climate Change on Human Health*. (2024, January). Retrieved from World Economy Forum: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Quantifying_the_Impact_of_Climate_Change_on_Human_Health_2024.pdf
- Radouane N. (2022). A comprehensive review of composite phase change materials (cPCMs) for thermal management applications, including manufacturing processes, performance, and applications. *Energies*, 15, 8271.
- Rahman A., Yusuf A., Putri R.A., Anggraini Y., Berthalita F., Kurnia D., Wonorahardjo S., Sutjahja I.M. (2021). Effect of Static Magnetic Field on Nucleation of Cobalt Nitrate Hexahydrate. *Mater Res.*, 24, e20210088.

- Rahman M.M., Oni A.O., Gemechu E., Kumar A. (2020). Assessment of energy storage technologies: A review. *Energy Conversion and Management*, 223, 113295.
- Ribar B. dan Divjaković V. (1973). A new crystal structure study of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. *Acta Cryst.*, 1546–1548.
- Rosensweig R. (1985). *Ferrohydrodynamics*. Dover Publications.
- Sadeghi G. (2022). Energy storage on demand: Thermal energy storage development, materials, design, and integration challenges. *Energy Storage Materials*, 46, 192–222.
- Saleel C.A. (2022). A review on the use of coconut oil as an organic phase change material with its melting process, heat transfer, and energy storage characteristics. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147, 4451–4472.
- Sarbu I. dan Sebarchievici C. (2018). A comprehensive review of thermal energy storage. *Sustainability*, 10(1).
- Sarı A. (2003). Thermal reliability test of some fatty acids as PCMs used for solar thermal latent heat storage applications. *Energy Conversion and Management*, 44, 2277–87.
- Scafetta N. (2024). Impacts and risks of “realistic” global warming projections for the 21st century. *Geoscience Frontiers*, 15(2), 101774.
- Schischke E., Grevé A., Ehrenstein U., dan Doetsch C. (2024). Overview of Energy Storage Technologies Besides Batteries. In *Emerging Battery Technologies to Boost the Clean Energy Transition: Cost, Sustainability, and Performance Analysis*. Stefano Passerini, Linda Barelli, Manuel Baumann, Jens F. Peters, Marcel Weil (editors). Springer.
- Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 318–345.
- Shokouhmand H. dan Kamkari B. (2013). Experimental investigation on melting heat transfer characteristics of lauric acid in a rectangular thermal storage unit. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 50, 201–212.
- Silalahi A.O., Sukmawati N., Sutjahja I.M., Kurnia D., Wonorahardjo S. (2017). Thermophysical Parameters of Organic PCM Coconut Oil from T-History Method and Its Potential as Thermal Energy Storage in Indonesia. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 214, 012034.
- Silalahi A.O., Sutjahja I.M., Kurnia D., Wonorahardjo S. (2019). Thermophysical parameters of organic PCM coconut oil from the T-

- history method and its variation with the chemical dopant. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1204 (2019) 01205, 012055.
- Singh S.K. dan Savoy A.W. (2020). Ionic liquids synthesis and applications: An overview. *Journal of Molecular Liquids*, 297, 112038.
- Sun M., Liu T., Sha H., Li M., Liu T., Wang X., Chen G., Wang J., Jiang D. (2023). A review on thermal energy storage with eutectic phase change materials: Fundamentals and applications. *Journal of Energy Storage*, 68, 10.
- Sutjahja I.M., Anggraini Y., Yusuf A. (2024). Acceleration of Heat Discharge of Composite Lauric Acid Using Magnetic Dopant. *Journal of Energy Storage*, 86, 111219.
- Sutjahja I.M., Rahman A., Putri R.A., Swandi A., Anggraini R., Wonorahardjo S., Kurnia D., Wonorahardjo S. (2019). Electrofreezing of the phase-change material $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and its impact on supercooling and the nucleation time. *Hem Ind.*, 73(6), 363-374.
- Sutjahja I.M., Silalahi A.O., Kurnia D., Wonorahardjo S. (2018). Thermophysical parameters and enthalpy-temperature curve of phase change material with supercooling from T-history data. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, 80.
- Sutjahja I.M., Silalahi A.O., Sukmawati N., Kurnia D., Wonorahardjo S. (2018). Variation of thermophysical parameters of PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ with dopant from T-history data analysis. *Mater. Res. Express* 5, 034007.
- Sutjahja I.M., Wonorahardjo S., Wonorahardjo S. (2020). Study on Physicochemical and Thermal Properties of Tetrabutylammonium-Based Cation Ionic Salts Induced by Al_2O_3 Additive for Thermal Energy Storage Application. *Inorganics*, 8, 51.
- Sutjahja I.M., Yusuf A., Anggraini Y., Ulhaq S.D., Kurnia D., Wonorahardjo S. (2024). Asymmetrical melting and solidification processes of phase change material and the challenges for thermal energy storage systems. *Archives in Thermodynamics*, 45(3), 135-147.
- Telkes M. (1952). Nucleation of supersaturated inorganic salt solutions. *Ind. Eng. Chem.*, 44(6), 1308-1310.
- Thirugnanasambandam M., Iniyani S., Goic R. (2010). A review of solar thermal technologies. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 14(1), 312-322,.
- Timofeeva E.V., Yu W., France D.M., Singh D., & Routbort J.L. (2011). Nanofluids for heat transfer: An engineering approach. *Nanoscale Research Letters*, 6(1), 1-7.

- Vargas J.M., Socolovsky L.M., Knobel M., Zanchet D. (2005). Dipolar interaction and size effects in powder samples of colloidal iron oxide nanoparticles. *Nanotechnology*, 16(5), S285–S290.
- Vinod S., Philip J. (2022). Thermal and rheological properties of magnetic nanofluids: Recent advances and future directions. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 307, 102729.
- Wang J., He Y., Li J., Kou H., Beaugnon E. (2017). Strong magnetic field effect on the nucleation of a highly undercooled Co-Sn melt. *Sci. Rep.*, 7, 1–8.
- Wang J., Li G., Li T., Zeng M., & Sundén B. (2021). Effect of various surfactants on stability and thermophysical properties of nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(6), 4057–4070.
- Wang J., Yang X., Klemeš J.J., Tian K., Ma T., Sunden B. (2023). A review on nanofluid stability: preparation and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188, 113854.
- Wang R., Chen T., Qi J., Du J., Pan G., Huang L. (2021). Investigation on the heat transfer enhancement by nanofluid under electric field considering electrophoretic and thermophoretic effect. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101498.
- Welty J.R., Wicks J.E., Wilson R.E., Rorrer G.L. (2007). *Fundamental of Heat transfer*, 4th ed. Wiley.
- Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., Damiati S.A. and Kurnia D. (2019). Adjustment of indoor temperature using internal thermal mass under different tropical weather conditions. *Science and Technology for the Built Environment*, 26(2).
- Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., Kurnia D., Fahmi Z., Putri W.A. (2018). Potential of Thermal Energy Storage Using Coconut Oil for Air Temperature Control. *Buildings*, 8(8).
- Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., Mardiyati Y., Andoni H., Dixon Thomas, Achsani R.A., Steven S. (2020). Characterising thermal behaviour of buildings and its effect on urban heat island in tropical areas. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11, 129–142.
- Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., Tunçbilek E., Achsani R.A., Arıcı M., Rahmah N. (2021). PCM-based passive air conditioner in urban houses for the tropical climates: An experimental analysis on the stratum air circulation. *Building and Environment*, 192, 107632.
- Wu Y., Zhang X., Xu X., Lin X., dan Liu L. (2020). A review on the effect of external fields on solidification, melting and heat transfer

- enhancement of phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 31, 101567.
- Yinping Z., Yi J. and Yi J. (1999). A simple method The T–History method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. *Meas. Sci. Technol.*, 10, 201–205.
- Yuan K., Shi J., Aftab W., Qin M., Usman A., Zhou F., Lv Y., Gao S., Zou R. (n.d.). Engineering the Thermal Conductivity of Functional Phase-Change Materials for Heat Energy Conversion, Storage, and Utilization. *Adv. Funct. Mater.*, 30(8), 1904228.
- Yuan Y., Zhang N., Tao W., Cao X., He Y. (2014). Fatty acids as phase change materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 482–498.
- Yusuf A., Putri R.A., Rahman A., Anggraini Y., Kurnia D., Wonorahardjo S., Sutjahja I.M. (2021). Time-Controlling the Latent Heat Release of Fatty Acids using Static Electric Field. *Journal of Energy Storage*, 33.
- Zahir M.H., Mohamed S.A., Saidur R., Al-Sulaiman F.A. (2019). Supercooling of phase-change materials and the techniques used to mitigate the phenomenon. *Appl. Energy*, 240, 793–817.
- Zalba B., Marín J.M., Cabeza L.F., Mehling H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23, 251–283.
- Zare M. dan Mikkonen K.S. (2023). Phase Change Materials for Life Science Applications. *Adv. Funct. Mater.*, 33, 2213455.
- Zhao Y., Zhang X., Xu X., Zhang S. (2020). Research progress in nucleation and and supercooling induced by phase change materials. *J. Energy Storage*, 27, 101156.
- Zhu J., Bai L., Chen B., Fei W. (2009). Thermodynamical properties of phase change materials based on ionic liquids. *Chemical Engineering Journal*, 147, 58–62.

CURRICULUM VITAE



Nama : Inge Magdalena Sutjahja
Tempat/tgl lahir : Jakarta/10 Nopember 1973
Kel. Keahlian : Fisika Magnetik dan Fotonik
Alamat Kantor : Prodi Fisika, FMIPA,
Jl. Ganesha 10 Bandung 40132
Nama Suami : Prof. Surjamanto Wonorahardjo
Nama Anak : Sannia Josephine,
Sandia Jonathan,
Sanferis Johanesa

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

No.	Jenjang Pendidikan	Perguruan Tinggi	Tahun Lulus	Gelar	Bidang
1.	S1	Institut Teknologi Bandung	1996	S.Si.	Fisika
2.	S2	Institut Teknologi Bandung	1998	M.Si.	Fisika
3.	S3	Universiteit van Amsterdam	2003	Ph.D.	Fisika

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

No.	Nama Jabatan	Tahun
1.	Aesor Sertifikasi Dosen (serdos) Nasional	2016
2.	Tim Re-akreditasi Program Studi Sarjana Fisika, FMIPA ITB.	2018
3.	Asesor beban kinerja dosen ITB	2021-2023
4.	Anggota Tim Pelaksana Kegiatan Strategi Menggapai Sukses Pribadi dlam Pembinaan Mahasiswa Baru	2013-2019
5.	Wakil Koordinator Mata Kuliah Fisika Dasar TPB	2015-2022
6.	Anggota senat FMIPA ITB	2023-2027
7.	Anggota tim kurikulum pascasarjana Fisika FMIPA ITB	2024

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

No.	Pangkat	Golongan Ruang	TMT
1.	Penata Muda	III/a	01/12/1995
2.	Penata Muda Tingkat I	III/b	01/04/2000
3.	Penata	III/c	01/04/2002

No.	Pangkat	Golongan Ruang	TMT
4.	Penata Tingkat I	III/d	01/04/2007
5.	Pembina	IV/a	01/10/2013
6.	Pembina Tingkat I	IV/b	01/04/2016
7.	Pembina Utama Muda	IV/c	01/04/2024

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

No.	Jabatan Fungsional	TMT
1.	Asisten Ahli Madya	01/10/1997
2.	Asisten Ahli	01/11/1999
3.	Lektor	01/01/2002
4.	Lektor Kepala	01/10/2013
5.	Profesor/Guru Besar	01/08/2023

V. KEGIATAN PENELITIAN

No.	Peneliti, Judul Penelitian	Sumber dana; Tahun
1.	Inge M. Sutjahja , S. Wonorahardjo, D. Kurnia, Peningkatan Transfer Kalor pada PCM Asam Laurat dengan Medan Listrik untuk Aplikasi Penyimpan Energi Termal Laten	Riset Unggulan ITB; 2024
2.	S. Wonorahardjo, Inge M. Sutjahja , Model Intervensi Lingkungan Material pada Kawasan Perkotaan sebagai Faktor Pergerakan Udara untuk Mitigasi Urban Heat Island Intensity	Riset Unggulan ITB; 2024
3.	Inge Magdalena Sutjahja , Daniel Kurnia, Pengaruh Medan Listrik AC pada Nukleasi PCM untuk Aplikasi Konservasi Energi	Riset Unggulan ITB; 2023
4.	Inge Magdalena Sutjahja , Efek Geometri pada Kinerja PCM Organik Berbasis Fatty Acid	Penelitian Disertasi Doktor; 2022
5.	S. Wonorahardjo, Inge M. Sutjahja , Pembuatan model dinding sandwich aktif yang sesuai daerah tropis dengan konsep pengelolaan kalor yang mampu mengurangi efek pemanasan lingkungan dan hemat energi operasional bangunan	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (PTUPT) Ristekdikti; 2020-2022
6.	Inge M. Sutjahja , S. Wonorahardjo, Efek medan magnetik dan dopan magnetik pada nukleasi material berubah fase untuk optimasi kinerja sistem penyimpan energi termal	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi Ristekdikti; 2020
7.	Inge M. Sutjahja , Daniel Kurnia, Sparisoma Viridi; Pengaruh Dopan Magnetik Nanopartikel Pada Konduktivitas Termal Phase Change Material	Penelitian Pendidikan Magister menuju Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU), Ristekdikti; 2019-2021
8.	S. Wonorahardjo, Inge M. Sutjahja , Mardiyati; Pemodelan Smart Insulation untuk Gedung Sebagai Teknologi Mitigasi Local Warming	Riset Multidisiplin ITB; 2019

No.	Peneliti, Judul Penelitian	Sumber dana; Tahun
9.	Inge M. Sutjahja , S. Wonorahardjo, Daniel Kurnia, Enthalpy Bergantung Temperatur dari PCM Berbasis Garam Hidrat sebagai Karakteristik Dasar Sistem Penyimpan Kalor Laten untuk Aplikasi Pengkondisi Udara Ruang	Ristekdikti; 2018-2019
10.	S. Wonorahardjo, Inge M. Sutjahja , Daniel Kurnia, Pembuatan Model Manajemen Massa Termal Ruang Menggunakan PCM Berbasis Minyak Kelapa untuk Pengkondisian Udara Pasif dan Penghematan Energi Listrik	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (PTUPT); 2018-2019
11.	Inge M. Sutjahja , Surjani Wonorahardjo, Thermophysical Characterization of Ionic Liquid based on Imidazolium or Ammonium Cations as Latent Thermal Energy Storage	Asahi; 2018
12.	S. Wonorahardjo, Inge M. Sutjahja , Mardiyati; Metode dan Pembuatan Model Insulasi Termal untuk Teknologi Mitigasi Lingkungan Thermal Perkotaan	Riset Multidisiplin ITB; 2018
13.	Inge M. Sutjahja , S. Wonorahardjo, Daniel Kurnia, Enthalpy Bergantung Temperatur dari PCM Berbasis Garam Hidrat sebagai Karakteristik Dasar Sistem Penyimpan Kalor Laten untuk Aplikasi Pengkondisi Udara Ruang	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi (PDUPT), Hibah Desentralisasi DIKTI; 2018
14.	Inge M. Sutjahja , S. Wonorahardjo, Daniel Kurnia, Peningkatan Performa PCM Berbasis Minyak Kelapa melalui Dopant dan Pengaruhnya pada Parameter Termofisika untuk Konservasi Energi	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi (PDUPT), Hibah Desentralisasi DIKTI; 2017-2019
15.	S. Wonorahardjo, Inge M. Sutjahja , Pembuatan Model Manajemen Massa Termal Ruang Menggunakan PCM Berbasis Minyak Kelapa untuk Pengkondisian Udara Pasif dan Penghematan Energi Listrik	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (PTUPT); 2017-2019
16.	S. Wonorahardjo, Inge M. Sutjahja , D. Kurnia, Pembuatan Modul Penukar Kalor pada Sistem TES untuk Aplikasi Pengkondisi Udara Ruang Hemat Energi	Insinas Riset Pratama Individu; 2016-2017
17.	Inge M. Sutjahja , Kajian Aditif Kimiawi pada Parameter Termofisika dari PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ untuk Aplikasi Konservasi Energi	Hibah Desentralisasi DIKTI; 2016
18.	S. Wonorahardjo, Inge M. Sutjahja , Prototipe Dinding Phase Change Material (PCM) Untuk Mengurangi Beban Pendinginan AC dan Menghemat Energi Operasional Gedung	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (PTUPT); 2015-2016
19.	S. Wonorahardjo, Inge M. Sutjahja , Efektivitas Konservasi Energi pada Aplikasi Teknologi Pengkondisi Udara pasif Berbasis PCM Garam Hidrat $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan Asam Laurat	Penelitian Terapan; 2015

No.	Peneliti, Judul Penelitian	Sumber dana; Tahun
20.	S. Wonorahardjo, Inge M. Sutjahja , Pembuatan Modul Manajemen Temperatur Udara Ruang Menggunakan PCM (Phase Change Material) Dalam Upaya Konservasi Energi	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (PTUPT); 2015-2016
21.	Inge M. Sutjahja , Efek Doping Grafit pada Phase Change Material Berbasis Garam Hidrat CaCl ₂ .6H ₂ O Untuk Aplikasi Konservasi Energi Pengkondisian Udara untuk Mencapai Kenyamanan Termal	Hibah Desentralisasi DIKTI; 2014-2016
22.	S. Wonorahardjo, Inge M. Sutjahja , Prototipe Dinding Phase Change Material (PCM) Untuk Mengurangi Beban Pendinginan AC dan Menghemat Energi Operasional Gedung	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (PTUPT); 2014
23.	Inge M. Sutjahja , Dopant Effect in the Magnetism of Co-Based Perovskite Sr _{1-x} Y _x CoO ₃ System	Riset Grant Toray; 2013
24.	Inge M. Sutjahja , Efek Dopan pada Sifat Magnetik dan Transport Listrik dari Sistem Perovskite Sr _{1-x} Y _x (Co,TM)O ₃	Riset Inovasi KK ITB; 2013

VI. PUBLIKASI

Dalam Jurnal Internasional Bereputasi

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama jurnal Vol.(No.), tahun, halaman
1.	I.M. Sutjahja , F. Berthalita, M. Mustaqima, A.A. Nugroho, M.O. Tjia; Effects of Partial Co Replacement by Fe in Sr _{0.775} Y _{0.225} CoO _{3-d} on its Magnetic Property, Oxygen Deficiency and Crystal Structure	Materials Science-Poland 33(3), 2015, p. 579–587
2.	Eka Nurfani, Nabilah Zuhairah, Robi Kurniawan, Shibghatullah Muhammady, Inge Sutjahja , Toto Winata, Yudi Darma; Influence of Ti doping on the performance of a ZnO-based photodetector	Materials Research Express 4(2), 2017, p. 024001
3.	Shibghatullah Muhammady, Eka Nurfani, Robi Kurniawan, Inge Sutjahja , Toto Winata, Yudi Darma; The effect of Ta dopant on the electronic and optical properties of anatase TiO ₂ : a first-principles study	Materials Research Express 4(2), 2017, p. 024002
4.	Eka Nurfani, Robi Kurniawan, Takashige Aono, Kohei Takeda, Yuma Shirai, Inge M. Sutjahja , Andriwo Rusydi, Toto Winata, Kouichi Takase, and Yudi Darma; Defect-induced excitonic recombination in Ti _x Zn _{1-x} O thin films grown by DC-unbalanced magnetron sputtering	Japanese Journal of Applied Physics 56(11), 2017, p. 112101
5.	Shibghatullah Muhammady, Inge M. Sutjahja , Andriwo Rusydi, Toto Winata, Kouichi Takase, and Yudi Darma; Unrevealed electronic and optical properties of the layered	Japanese Journal of Applied Physics 56(12), 2017, p. 121201

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama jurnal Vol.(No.), tahun, halaman
	oxychalcogenides (LaO)CuCh (Ch = S, Se, Te): A density-functional study	
6.	R Kurniawan, I.M. Sutjahja , T Winata, TS Heng, J Ding, A Rusydi, Y Darma; Polarization behavior of zinc oxide thin films studied by temperature dependent spectroscopic ellipsometry	Optical Materials Express 7(11), 2017, p. 3902-3908
7.	Shibghatullah Muhammady, Inge M. Sutjahja ; Contribution of on-site Coulomb repulsion energy to structural, electronic and magnetic properties of SrCoO ₃ for different space groups: first-principles study	Materials Science-Poland 35(4), 2017, p. 846–856
8.	Inge M. Sutjahja , Febri Berthalita, Agustinus Agung Nugroho, May On Tjia; Different Dopant Related to Magnetic Order and Local Structural changes in SrYCoO ₃ Based Compound	U.P.B. Sci. Bull., Series B 80(2), 2018, p. 135–148
9.	Shibghatullah Muhammady, Inge M. Sutjahja ; Spin states of Co ³⁺ ions in Sr _{0.75} Y _{0.25} CoO _{2.625} system induced by Jahn-Teller distortion: a density-functional study	Mater. Res. Express 5, 2018, p. 96101
10.	Inge Magdalena Sutjahja , Alfriska Silalahi, Daniel Kurnia, Surjamanto Wonorahardjo; Thermophysical Parameters and Enthalpy-Temperature Curve of PCM with Supercooling from T-History Data	U.P.B. Sci. Bull., Series B 80(2), 2018, p. 57-70
11.	I.M. Sutjahja , Alfriska O Silalahi, Nissa Sukmawati, D Kurnia and S Wonorahardjo; Variation of thermophysical parameters of PCM CaCl ₂ .6H ₂ O with dopant from T-history data analysis	Mater. Res. Express 5(3), 2018, p. 034007
12.	Surjamanto Wonorahardjo, Inge Magdalena Sutjahja , Daniel Kurnia, Zulfikar Fahmi and Widya Arisya Putri; Potential of Thermal Energy Storage Using Coconut Oil for Air Temperature Control	Buildings 8(8), 2018, p. 95
13.	Eka Nurfani, Christoforus Dimas Satrya, Irfan Abdurrahman, Inge Magdalena Sutjahja , Toto Winata, Kouichi Takase, Andriwo Rusydi, Yudi Darma; Weakening of excitonic screening effects in Ti _x Zn _{1-x} O thin films	Thin Solid Films 645, 2018, p. 399-404
14.	S. Wonorahardjo, I.M. Sutjahja , D. Kurnia; Potential of Coconut Oil for Temperature Regulation in Tropical Houses.	Journal of Engineering Physics and Thermophysics 92, 2019, p. 80–88
15.	Surjamanto Wonorahardjo, Inge Sutjahja , Siti Aisyah Damiami and Daniel Kurnia; Adjustment of indoor temperature using internal thermal mass under different tropical weather conditions	Science and Technology for the Built Environment 26(2), 2019, p. 115-127

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama jurnal Vol.(No.), tahun, halaman
16.	I.M. Sutjahja , A. O. Silalahi, S. Wonorahardjo, D. Kurnia; Thermal Conductivity of Phase-Change Material $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ With ZnO Nanoparticle Dopant Based On Temperature-History Method	Romanian Journal of Materials 49(2), 2019, 185–192
17.	Sutjahja, I.M. , Rahman, A., Putri, R.A., Swandi, A., Anggraini, R., Wonorahardjo, S., Kurnia, D., Wonorahardjo, S.; Electrofreezing of the phase-change material $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and its impact on supercooling and the nucleation time	Hemijiska Industrija 73(6), 2019, p. 363–374
18.	Surjamanto Wonorahardjo, Inge Magdalena Sutjahja , Y. Mardiyati, Heri Andoni, Dixon Thomas, Rizky Amalia Achsani, S. Steven; Characterising thermal behaviour of buildings and its effect on urban heat island in tropical areas	International Journal of Energy and Environmental Engineering 11, 2020, 129–142
19.	Inge M. Sutjahja , Surjani Wonorahardjo and Surjamanto Wonorahardjo; Study on Physicochemical and Thermal Properties of Tetrabutylammonium-Based Cation Ionic Salts Induced by Al_2O_3 Additive for Thermal Energy Storage Application	Inorganics 8(9), 2020, p. 51
20.	Ahmad Swandi, Annisa Rahman, Risky Afandi Putri, Radhiah Anggraini, Daniel Kurnia, Surjamanto Wonorahardjo, and Inge Magdalena Sutjahja ; Effect of copper electrode geometry on electrofreezing of the phase-change material $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics 46(2), 2021, p. 163-174
21.	Akhmad Yusuf, Risky Afandi Putri, Annisa Rahman, Yunita Anggraini, Daniel Kurnia, Surjamanto Wonorahardjo, Inge Magdalena Sutjahja ; Time-Controlling the Latent Heat Release of Fatty Acids using Static Electric Field	Journal of Energy Storage 33, 2021, p. 102045
22.	Surjamanto Wonorahardjo, and Inge Magdalena Sutjahja , Ekrem Tunçbilek, Rizky Amalia Achsani, Müslüm Arıcı, Nadiya Rahmah; PCM-based passive air conditioner in urban houses for the tropical climates: An experimental analysis on the stratum air circulation	Building and Environment 192, 2021, p. 107632
23.	Muhammad A. Irham, Mohamad S. Anrokhi, Yunita Anggraini, Inge M. Sutjahja ; Dopant Effect On Phenalene Bandgap Control: A Hückel Molecular Orbital Perspective	Quimica Nova 44(9), 2021, p. 1204-1209
24.	Annisa Rahman, Akhmad Yusuf, Risky Afandi Putri, Yunita Anggraini, Febri, Berthalita Pujaningsih, Daniel Kurnia, Surjamanto Wonorahardjo, Inge Magdalena Sutjahja ; Effect of Static Magnetic Field on Nucleation of Cobalt Nitrate Hexahydrate	Materials Research 24(6), 2021, p. e20210088
25.	Yunita Anggraini, Alfriska O. Silalahi, Inge Magdalena Sutjahja , Daniel Kurnia, Sparisoma Viridi, Surjamanto Wonorahardjo; Temperature-Dependent Thermal	Instrumentation Measure Métrologie 20(4), 2021, p. 195-202

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama jurnal Vol.(No.), tahun, halaman
	Conductivity Measurement System for Various Heat Transfer Fluids	
26.	Risky Afandi Putri, Akhmad Yusuf, Annisa Rahman, Yunita Anggraini, Daniel Kurnia, Surjani Wonorahardjo, Surjamanto Wonorahardjo, Inge M Sutjahja ; Reduction of the supercooling of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ using electric field and nucleating agent effects	Journal of Energy Storage 42, 2021, p. 103020
30.	Yunita anggraeni, Inge Magdalena Sutjahja ; Analysis of Biphenylene and Benzo{3,4}cyclobuta{1,2-c}thiophene Molecular Orbital Structure using the Hückel Method	Revista de Chimie Vol. 72(3), 2021, p. 198-209
27.	Yuanita P. D. Sudarso, Arifin L. Maulana, Agoes Soehiani, and Inge M.Sutjahja ; Ring Current In Anthracene and Phenantrene: Correction To HÜckel Parameters	Quimica Nova 45(6), 2022, p. 742-749
28.	Surjamanto Wonorahardjo, Inge Magdalena Sutjahja , Y. Mardiyati, Heri Andoni, Rizky Amalia Achsani, S. Steven, Dixon Thomas, Ekrem Tunçbilek, Müslüm Arıcı, Nadiya Rahmah, Suwardi Tedja; Effect of different building façade systems on thermal comfort and urban heat island phenomenon: An experimental analysis	Building and Environment 217, 2022, p. 109063
29.	Yunita Anggraini, Akhmad Yusuf, Surjani Wonorahardjo, Daniel Kurnia, Sparisoma Viridi, Inge Magdalena Sutjahja ; Role of C2 methylation and anion type on the physicochemical and thermal properties of imidazolium-based ionic liquids	Arabian Journal of Chemistry 15(8), 2022, p. 103963
30.	Sutjahja, I.M. , Sudarso, Y.P.D., Ulhaq, S.D., Yutomo, E.B., Aromaticity of aza aromatic molecules: prediction from hückel theory with modified parameters	Quimica Nova 46(4), 2023, p. 319–328
31.	Yunita Anggraini, Akhmad Yusuf, Sparisoma Viridi, Daniel Kurnia, Surjamanto Wonorahardjo, Inge Magdalena Sutjahja , Magnetic dopant and field effects on the heat discharge of organic PCM based lauric acid	Experimental Thermal and Fluid Science 152, 2024, p. 111105
32.	Inge Magdalena Sutjahja , Yunita Anggraini, Akhmad Yusuf, Acceleration of heat discharge of composite lauric acid using magnetic dopant	Journal of Energy Storage 86, 2024, p. 111219
33.	Inge Magdalena Sutjahja , Akhmad Yusuf, Yunita Anggraini, Shofi D 'Ulhaq, Daniel Kurnia, Surjamanto Wonorahardjo, Asymmetrical melting and solidification processes of phase change material and the challenges for thermal energy storage systems	Archives of Thermodynamics 45(3), 2024, p. 135-147

Dalam Jurnal Nasional Terakreditasi

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama jurnal; Vol./ No./ tahun Publikasi/hal.
1.	A Swandi, S Rahmadhanningsih, S Viridi, and IM Sutjahja ; Trial of DC Submersible Pump 12 Volt 50 Watt with Solar Power and Relationship between Water Discharge and Storage Height	Journal of Physical Science and Engineering Vol. 6, No. 2, 2021
2.	Shighatullah Muhammady, Freddy Giovanni Setiawan, Inge Magdalena Sutjahja , Toto Winata and Yudi Darma; Studi Ab Initio dengan metode GGA dan GGA + U Terpolarisasi Spin Untuk Mengkaji Sifat Elektronik dan magnetik Kristal TiO ₂ pada Fasa Rutile, Anatase, dan Brookit	Jurnal Matematika & Sains 19/3/2014
3.	S.R.A Usna, I.M. Sutjahja , D Kurnia, Pengaruh Penambahan Nukleator SrCl ₂ .6H ₂ O dan Pengental HEC terhadap Efek Supercooling dan Pemisahan Fase PCM CaCl ₂ .6H ₂ O	Wahana Fisika 6 (2), 2021, p. 116-129
4.	Inge Magdalena Sutjahja , Sufiyah Assegaf, Surjamanto Wonorahardjo, Digital Simulation as Learning Aid for Heat Flow in Solid Theoretical Understanding	JPSE (Journal of Physical Science and Engineering), Vol 5(1), 2020, p. 11-21
5.	Yunita Anggraini, Inge Magdalena Sutjahja , Cairan Ionik sebagai Penyerap Gas CO ₂	ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia, Vol. 19(1), 2023, p. 247-260

Dalam Prosiding Seminar Internasional

No.	Pengarang; Judul makalah	Seminar; Tahun; prosiding publikasi
1.	Robi Kurniawan, Inge M. Sutjahja , Toto Winata, Andriwo Rusydi, and Yudi Darma, Room temperature analysis of dielectric function of ZnO-based thin film on fused quartz substrate	The 5th International Conference on Mathematics and Natural Sciences / Bandung, Indonesia / 2–3 November 2014. AIP Conf. Proc. 1677, 2015, p. 070002
2.	R Kurniawan, E Nurfani, S Muhammady, IM Sutjahja , T Winata, Y Darma, Influence of annealing treatment on electric polarization behaviour of zinc oxide films grown by low-power dc-unbalanced magnetron sputtering	8th International Conference on Physics and its Applications (ICOPIA) / Denpasar, Indonesia / 23–24 August 2016; Journal of Physics: Conference Series 776, 2016, p. 012043

No.	Pengarang; Judul makalah	Seminar; Tahun; prosiding publikasi
3.	I M Sutjahja , S Rahayu A U., Nia Kurniati, Iyvalentine D Pallitine, D Kurnia, The role of chemical additives to the phase change process of $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ to optimize its performance as latent heat energy storage system	6th Asian Physics Symposium / Bandung, Indonesia / 19–20 August 2015; Journal of Physics: Conference Series 739, 2016, p. 012064
4.	Eka Nurfani, Angga Virdian, Robi Kurniawan, Shibghatullah Muhammady, Inge M. Sutjahja , Toto Winata, Yudi Darma, Electrical properties of ZnO-based photodetector prepared by room temperature DC unbalanced magnetron sputtering	Second International Seminar on Photonics, Optics, and Its Applications (ISPhOA 2016) / Bali, Indonesia / 24-25 August 2016; Proc. SPIE 10150/1/2016
5.	Kurniawan R, Nurfani E, Muhammady S, Sutjahja I M , Winata T, Rusydi A and Darma Y, Polarity enhancement in high oriented ZnO films on Si (100) substrate	The 3rd International Conference on Advanced Materials Science and Technology (ICAMST 2015) / Semarang, Indonesia / 6–7 October 2015; AIP Conference Proceedings 1725, 2016, p. 020035
6.	Alfriska O. Silalahi, Nissa Sukmawati, I.M. Sutjahja , D. Kurnia, S. Wonorahardjo; Thermophysical Parameters of Organic PCM Coconut Oil from T-History Method and Its Potential as Thermal Energy Storage in Indonesia	2nd Materials Research Society of Indonesia Meeting (MRS-Id 2016) / Bandung-Indonesia / 24–26 October 2016; IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 214, 2017, p. 012034
7.	WA Putri, IM Sutjahja , D Kurnia, S Wonorahardjo, The effectiveness of organic PCM based on lauric acid from coconut oil and inorganic PCM based on salt hydrate $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ as latent heat energy storage system in Indonesia	Journal of Physics Conference Series 739, 2016, p. 012119
8.	I M Sutjahja , Widya A Putri, Z Fahmi, S Wonorahardjo, D Kurnia; Heat exchange studies on coconut oil cells as thermal energy storage for room thermal conditioning	International Conference on Energy Sciences (ICES 2016) / Bandung, Indonesia / 25–27 July 2016 IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 877, 2017, p. 012038
9.	Alfriska O Silalahi, I M Sutjahja , D Kurnia, S Wonorahardjo; The enthalpy-temperature curve of new PCM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ for low-temperature latent TES	7th Asian Physics Symposium / Bandung, Indonesia / 29–31 August 2017; Journal of Physics: Conf. Series 1204, 2019, p. 012057

No.	Pengarang; Judul makalah	Seminar; Tahun; prosiding publikasi
10.	I M Sutjahja , Alfriska O Silalahi, D Kurnia, S Wonorahardjo; The role of particle dopant to the thermal conductivities of PCM coconut oil by means of the T-history method	7th Asian Physics Symposium / Bandung, Indonesia / 29–31 August 2017; Journal of Physics: Conf. Series 1204, 2019, p.
11.	Heri Andoni, Aldissain Jurizat, Steven, Dixon Thomas, Rizky Amalia Achsani, Inge Magdalena Sutjahja , Mardiyati, Surjamanto Wonorahardjo; Thermal Behaviour Studies on Building Walls based on Type and Composition of the Materials	International Conference on Design and Application of Engineering Materials (IC-DAEM) in conjunction with Seminar Nasional Metalurgi dan Material XI (SENAMM) / Bandung, Indonesia / 6–7 September 2018; IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 547, 2019, p.
12.	Alfriska O Silalahi, I M Sutjahja , D Kurnia and S Wonorahardjo; Thermophysical parameters of organic PCM coconut oil from the T-history method and its variation with the chemical dopant	7th Asian Physics Symposium / Bandung, Indonesia / 29–31 August 2017; Journal of Physics: Conf. Series 1204, 2019, p. 012055
13.	Aldissain Jurizat, Heri Andoni, Inge Magdalena Sutjahja , Surjamanto Wonorahardjo; Cell Sizes Study of Encapsulated Coconut Oil for Heat Exchanger Application	The 2nd International Conference on Energy Sciences (ICES) 2018 / Bandung, Indonesia / 24-26 September 2018; Journal of Physics: Conference Series 1772, 2021, p. 012010
14.	Alfriska O Silalahi, I M Sutjahja , D Kurnia, S Wonorahardjo, Measurement studies of thermal conductivity of water and coconut oil with nanoparticles dopant for thermal energy storage	The 2nd International Conference on Energy Sciences (ICES) 2018 / Bandung, Indonesia / 24-26 September 2018; Journal of Physics: Conference Series 1772, 2021, p. 012022
15.	A Rahman, A Swandi, R Anggraini, R A Putri, D Kurnia and I M Sutjahja ; The Effect of DC Voltage on Solidification of Tetrabutyl-Ammonium Bromide (TBAB) Aqueous Solution	8th Asian Physics Symposium (APS 2019) / Bandung, Indonesia / 3-4 October 2019; Journal of Physics: Conference Series 1949, 2021, p. 012006
16.	D. Thomas, H. Andoni, Steven, R.A. Achsani, I.M. Sutjahja , Mardiyati, S. Wonorahardjo; Thermophysical studies of common wall panels for controlling building thermal environment	7th International Conference of Advanced Materials Science and Technology / Bandung Indonesia / 25–26 September 2019; Materials Today: Proceedings Volume 44, Part 3, 2021, p. 3195-3198
17.	A Yusuf, S Wonorahardjo, IM Sutjahja ; Size effect at discharging process of coconut oil as latent thermal energy storage	Journal of Physics: Conference Series 2243 (1), 2022, p. 012074

No.	Pengarang; Judul makalah	Seminar; Tahun; prosiding publikasi
18.	A Yusuf, S Wonorahardjo, IM Sutjahja ; Geometry Effect of $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ at Charging and Discharging Process as Latent TES	Journal of Physics: Conference Series 2243(1), 2022, p. 012081
19.	S Wonorahardjo, IW Dasna, IM Sutjahja , S Wonorahardjo, S Suharti; Energy, chemistry, ethics, three interrelated domain for better living	AIP Conference Proceedings 2687, 2023, p. 040004
20.	A Swandi, R Anggraini, A Rahman, RA Putri, IM Sutjahja ; Effect of DC voltage and current on nucleation behavior of $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ hydrated salt using copper electrodes.	AIP Conference Proceedings 2614, 2023, p. 050015

Dalam Prosiding Seminar Nasional

No.	Pengarang; Judul makalah	Seminar; Tahun; Tempat publikasi
1.	Rizqi Fadli, M. Yan Pandu Akbar, Zaky Yudha, N. Amalia dan I. M. Sutjahja ; Perhitungan Energi Keadaan Dasar Molekul H_2 dengan Metode Hartree Fock Roothan dalam Program Berbasis MATLAB	Seminar Kontribusi Fisika 2018 / Bandung Indonesia / 4-5 Desember 2018; PROSIDING SKF 2018, hal. 174-181
2.	Lukas P. A. Krisna, Nova L. Rizkiyah, Fiqhri H. Murdaka, Nadya Amalia, Inge M. Sutjahja ; Optimasi Ekspansi Orbital Slater Dua Suku untuk Keadaan Dasar Elektron Atom Helium Berdasarkan Metode Hartree-Fock-Roothaan dalam Mathematica [®]	Seminar Kontribusi Fisika 2018 / Bandung Indonesia / 4-5 Desember 2018; PROSIDING SKF 2018, hal. 166-173

Buku Ajar

No.	Pengarang; Judul makalah	Penerbit; Tahun; ISBN
1.	M.O. Tjia, I.M. Sutjahja ; Teori Orbital Kuantum	CV Karya Putra Darwati; 2012, ISBN: 978-602-7573-22-3
2.	Inge M. Sutjahja ; Fisika Modern (Teori dan contoh Aplikasi Fenomena Tunneling) Ed. 2	ITB Press; 2018, ISBN: 978-602-5417-0
3.	Surjamanto Wonorahardjo, Inge M. Sutjahja ; Bangunan Gedung Hijau untuk Daerah Tropis (teori, konsep dan Penerapan)	ITB PRESS; 2018; ISBN: 978-602-5417-97-9

VII. PATEN

No.	Judul Paten/HAKI	No Paten/HAKI	Tahun
1.	Material insulasi termal berbahan dasar campuran limbah kulit jagung-epoksi dan metode pembuatannya	IDP000084779	2022
2.	Dinding untuk mengondisikan Udara Ruang Berbasis Minyak Kelapa dengan Prinsip Pertukaran Kalor Langsung	IDP000089672	2023
3.	Lapisan Insulasi Termal Dinding Luar Gedung Berbasis Bahan Daur Ulang Kertas Koran Untuk Pelindung Sinar Matahari Di Daerah Tropis	IDP000091840	2024

VIII. PENGHARGAAN

No.	Nama Penghargaan	Pemberi penghargaan	Tahun
1.	Satyalancana Karya Satya X Tahun	Rektor ITB	2013
2.	Satyalancana Karya Satya XX Tahun	Presiden Republik Indonesia	2019
3.	Penganugrahan Penghargaan Dekan FMIPA "Excelence in Education"	Dekan FMIPA ITB	2019
4.	Sertifikat penghargaan FMIPA "Dosen Terbaik Bidang Penelitian"	Dekan FMIPA ITB	2021
5.	Piagam penghargaan Univ. Boswa "Pameran Penelitian & Pengabdian Pada Masyarakat"	Rektor Univ. Boswa	2021
6.	Penghargaan Pengabdian 25 Tahun	Rektor ITB	2022

VIII. SERTIFIKASI

- Sertifikasi pendidik sebagai dosen profesional, Departemen Pendidikan Nasional, 2010.
- Sertifikat Assesor Beban Kerja Dosen (BKD), Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi, 2022.

ITB PRESS

📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
👤 Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
📄 APPTI No. 005.062.1.10.2018

**Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id [f](#) FgbItb [t](#) FGB_ITB
📱 [@fgbitb_1920](#) [▶](#) Forum Guru Besar ITB

ISBN 978-623-297-561-3

