



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PENGENDALIAN LINGKUNGAN TERMAL BANGUNAN DAN KAWASAN PERKOTAAN

Profesor Surjamanto Wonorahardjo

**Sekolah Arsitektur, Perencanaan, dan Pengembangan Kebijakan
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
27 Januari 2024**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**PENGEMBANGAN TEKNOLOGI
PENGENDALIAN LINGKUNGAN TERMAL
BANGUNAN DAN KAWASAN
PERKOTAAN**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**PENGEMBANGAN TEKNOLOGI
PENGENDALIAN LINGKUNGAN TERMAL
BANGUNAN DAN KAWASAN
PERKOTAAN**

Prof. Surjamanto Wonorahardjo

27 Januari 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:

**PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PENGENDALIAN LINGKUNGAN TERMAL
BANGUNAN DAN KAWASAN PERKOTAAN**

Penulis : Prof. Surjamanto Wonorahardjo

Reviewer : Prof. Elfahmi

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-390-9

e-ISBN : 978-623-297-391-6 (PDF)

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

PRAKATA

Syukur pada kasih Sang Pencipta yang menuntun kami untuk merawat ciptaan-Nya. Lingkungan hidup sebagai habitat dan ekosistem yang sempurna sering kali rusak karena ketidakpahaman pada cara kerjanya. Kajian-kajian konsep bersahabat dengan lingkungan atau konsep *green building – eco friendly* menghasilkan teknologi lingkungan yang lebih selaras dan harmonis dengan lingkungan dan makhluk hidup. Keseimbangan daya dukung terhadap bebannya menjadi kunci keberlanjutan lingkungan hidup yang menjadi tanggung jawab kita bersama.

Buku ini berisi konsep dan teknologi pengendalian lingkungan termal untuk ruang di dalam gedung hingga ruang kota. Konsep penyejukan udara *thermal balance* memiliki potensi sebagai pengganti *air conditioner* konvensional yang kita kenal saat ini. Konsep konvensional yang memindahkan kalor dari ruang dalam ke luar berdampak pada kenaikan temperatur udara luar yang kurang ramah ruang luar. Konsep penyimpanan, pbumian, konversi dan penundaan rambatan kalor berpotensi lebih ramah lingkungan. Aplikasi teknologi dalam skala luas akan berkontribusi mewarnai arsitektur bangunan dan perkotaan yang lebih dekat dengan keberlanjutan.

Terima kasih kepada istri tercinta Prof. Inge Magdalena Sutjahja S.Si., M.Si., Ph.D., yang setia menemani pengembangan teknologi ini melalui dukungan dasar-dasar sains fisika material dan perilaku termalnya.

Semoga buku ini bermanfaat untuk membangun lingkungan binaan yang berkelanjutan.

Bandung, 27 Januari 2024

Profesor Surjamanto Wonorahardjo

SINOPSIS

Pengembangan teknologi lingkungan binaan menjadi tanggung jawab kita bersama, bukan hanya untuk kemudahan dan kenyamanan manusia, tetapi juga menjamin keberlanjutan lingkungan binaannya. Oleh karena itu kita wajib memberikan arah dan menjaganya agar tetap memberikan jaminan lingkungan hidup yang baik bagi generasi mendatang. Tulisan ini berisi evaluasi terhadap teknologi bangunan konvensional serta arah dan lingkup perkembangannya khususnya untuk lingkungan termal, baik pada lingkup bangunan maupun kawasan perkotaan.

Perkembangan teknologi bangunan gedung diawali oleh penemuan material bangunan seperti beton, baja, batu bata, kaca, plastik, dan kompositnya. Pengembangan teknologi material dikendalikan oleh kebutuhan kekuatan, kekakuan untuk komponen-komponen bangunan seperti kolom, balok, dinding, dan lantai. Perkembangan sifat-sifat mekanik dari material tersebut mendukung struktur bangunan untuk menghasilkan kualitas ruang dan bangunan yang lebih baik bagi penggunanya. Dari sudut pandang ekonomi dan industri konstruksi, perkembangan material bangunan tersebut sangat mendorong pertumbuhan ekonomi. Tercatat indeks pertumbuhan ekonomi dari sektor industri komponen bangunan seperti kaca, *metal sheet*, beton pracetak sangat berperan dalam pembangunan ekonomi.

Dimensi sosial dan budaya juga mewarnai industri komponen bangunan dengan menghadirkan berbagai pilihan kualitas dan tampilan untuk keramik, kaca, panil dinding dan lain-lain. Untuk menjamin keberlanjutan lingkungan binaan, perkembangan teknologi komponen bangunan harus menjamin daya dukung lingkungan tidak dilampaui. Salah satu emisi yang belum banyak disadari adalah limbah kalor yang dikeluarkan oleh komponen dan bangunan gedung secara keseluruhan. Beton, bata, aspal adalah bahan bangunan berat yang memiliki sifat-sifat termal seperti menyerap, menyimpan dan melepas kalor ke lingkungannya. Sinar matahari sebagai sumber energi di permukaan kota-kota kita justru berdampak pada pemanasan lingkungan perkotaan yang dikenal dengan fenomena *urban heat island* (UHI). Upaya-upaya pendinginan ruang hidup dilakukan dalam skala kecil, pada ruang-ruang kerja di mana kenyamanan termal sangat dibutuhkan. Upaya penyejukan tersebut

menghabiskan banyak energi listrik dan membuang limbah kalor ke lingkungannya. Pada kondisi ini, disadari bahwa arah perkembangan teknologi kita sudah salah dan tidak berselaras dengan lingkungan alaminya.

Alam adalah induk pengetahuan. Belajar dari kerusakan lingkungan yang terjadi, kita membutuhkan teknologi baru untuk mengondisikan termal ruang dalam skala bangunan hingga kawasan perkotaan. Dibutuhkan teknologi material dan komponen bangunan baru seperti material berubah fasa atau *phase change material* (PCM) yang dapat menyerap dan menyimpan kalor pada siang hari untuk menggantikan penyejuk udara ruang. Kolaborasi lintas disiplin dengan fisika material termal, teknik kimia, dan teknik industri sangat dibutuhkan untuk pengembangan teknologi tersebut. Material selubung bangunan berperan ganda untuk menyaring gelombang elektromagnetik yang masuk ke dalam bangunan dan yang lepas ke ruang luar. Energi termal yang tertahan pada selubung akan terlepas ke lingkungan kawasannya menimbulkan masalah baru yaitu pemanasan lingkungan. Gerakan *green building* atau bangunan gedung hijau yang berorientasi ke ruang dalam bangunan saja, tidaklah cukup. Bangunan gedung hijau juga harus berorientasi pada ruang luar dan pengendalian dampak lingkungan untuk menjamin keberlanjutan lingkungan binaan.

Berbagai teknologi selubung bangunan pintar dengan konsep penyerapan pemantulan, pemanfaatan, pembuangan, pengubahan/konversi menunjukkan efektivitas yang berbeda-beda. Berbagai pendekatan pasif dan aktif patut diupayakan melibatkan *smart material* dalam aplikasi *energy harvesting*, baterai termal, *active façade* masih merupakan tantangan dan agenda penelitian besar saat ini. Semakin cepat kita menyelesaikannya semakin besar peluang untuk memimpin kemajuan teknologi komponen bangunan yang berkelanjutan di dunia. Dalam visi ekonomi dan industri, riset pada teknologi komponen bangunan ini membutuhkan kolaborasi lintas disiplin bagi kita semua.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
SINOPSIS	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
1 LINGKUNGAN TERMAL BANGUNAN DAN PERKOTAAN.....	1
1.1 Material Bangunan dan Lingkungan Termal	1
1.2 Pemanasan Kawasan Perkotaan	2
1.3 Karakterisasi Material Bangunan dan Kawasan Perkotaan	4
2. PENGENDALIAN LINGKUNGAN TERMAL PERKOTAAN	8
2.1 Konsep Penyimpanan Kalor	8
2.2 Konsep Insulasi Termal	10
2.3 Konsep Pembayangan	17
2.4 Konsep Pengurangan Masa Termal (Selubung Ringan)	20
2.5 Konsep Pemantulan	21
2.6 Konsep Konversi Energi.....	23
2.7 Façade Aktif	24
3. PENYEJUKAN UDARA RUANG.....	27
3.1 Evaluasi Ruang Dalam	27
3.2 Pengaturan Bukaannya Termal.....	31
3.3 Pengaturan Masa Termal	33
4 VISI KOLABORASI.....	46
5 UCAPAN TERIMA KASIH	49
DAFTAR PUSTAKA.....	53
CURRICULUM VITAE.....	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Komponen bangunan membentuk lingkungan termal kawasan perkotaan (digambar dengan bantuan AI)	2
Gambar 2	Profil temperatur udara di daerah urban dan sub-urban.....	3
Gambar 3	Contoh <i>visible image</i> (kiri) and <i>thermal infrared image</i> (kanan). Sumber: https:// coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2012/04/IR-baton-rouge.jpg	4
Gambar 4	Proses penangkapan radiasi matahari yang menyebabkan pemanasan lingkungan (Wonorahardjo, 2012).....	5
Gambar 5	Proporsi penggunaan bahan bangunan per 100 m ² di kawasan perkotaan di Bandung (Wonorahardjo, 2012).....	6
Gambar 6	Citra <i>visible</i> (kiri) dan <i>thermal infrared</i> (kanan). Dinding bata, genteng dan aspal merupakan komponen yang mengemisikan kalor. (Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., 2018)	7
Gambar 7	Dinding bata konvensional memberi dampak pada lingkungan termal.....	10
Gambar 8	Insulasi melindungi ruang dalam tetapi berdampak buruk pada ruang luar.	11
Gambar 9	Model <i>Sandwich Wall</i>	12
Gambar 10	Simulasi aliran kalor pada penampang dinding bata dan <i>sandwich</i> (Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., Mardiyati Y., Andoni H., Thomas D., Achsani R.A., Steven S., 2020)	13
Gambar 11	Hasil simulasi berbagai jenis dinding dengan insulasi setelah: (a) 4 jam; (b) 8 jam.....	14
Gambar 12	Simulasi efek penggunaan dinding bata dan <i>sandwich wall</i> pada ruang dalam dan luar.	15
Gambar 13	Efek insulasi sisi dalam dan sisi luar dinding bata terhadap temperatur udara ruang.....	16

Gambar 14	Lapisan panil pembayang pada permukaan dinding bata berperan seperti insulasi	18
Gambar 15	Lapisan panil di depan dinding melindungi dinding bata dan ruang dalam.....	18
Gambar 16	Perbandingan temperatur permukaan ACP, dinding bata, dan <i>low-E glass</i>	19
Gambar 17	Selubung kaca	20
Gambar 18	Perbandingan bangunan dengan fasad tunggal dan fasad ganda.....	21
Gambar 19	Penambahan lapisan reflektansi menurunkan simpanan kalor pada dinding.....	22
Gambar 20	Efek langsung dan tak langsung pada penurunan temperatur udara pada penerapan konsep pemantulan	23
Gambar 21	Dinding <i>Photovoltaic</i> dan <i>Photosynthesis</i>	24
Gambar 22	Prinsip kerja fasad aktif pada siang dan malam hari.....	25
Gambar 23	Pemindahan kalor dari ruang dalam ke ruang luar (gambar dibuat dengan bantuan AI).	27
Gambar 24	Langit-langit sebagai bukaan termal. Siang hari (kiri), malam (kanan) (Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., Tunçbilek E., Achsani R.A., Arıcı M., Rahmah N., 2021)	28
Gambar 25	Ruang dan pelingkup ruang (Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., Tunçbilek E., Achsani R.A., Arıcı M., Rahmah N., 2021)	29
Gambar 26	Temperatur permukaan langit-langit paling berfluktuasi dibanding permukaan dinding dan lantai.....	30
Gambar 27	Variasi temperatur udara di berbagai ketinggian dan temperatur udara luar sebagai acuan.....	30
Gambar 28	Metoda semprot untuk aplikasi material insulasi termal. Sumber: http://www.greenbuildingadvisor.com/blogs/dept/green-building-blog/procon-open-cell-or-closed-cell-foam	31
Gambar 29	Lintasan matahari di ekuator	32

Gambar 30	Ilustrasi perubahan fasa material PCM pada proses serapan dan lepasan kalor. Adaptasi dari (Sadeghi, 2022).....	33
Gambar 31	Klasifikasi PCM secara umum (Nishad S. dan Krupa I., 2022).	34
Gambar 32	Simulasi durasi melting lebih cepat dari <i>solidification</i> (a) <i>monitoring</i> temperatur di beberapa titik, (b) fraksi liquid dan solid dan durasi waktu yang dibutuhkan.	36
Gambar 33	Ilustrasi proses <i>melting</i> (serapan kalor) dan solidifikasi (lepasan kalor) pada PCM berbentuk bola.	37
Gambar 34	Ilustrasi peran Internal Thermal Mass untuk penyejukan udara ruang	38
Gambar 35	Perbandingan kinerja penyimpanan kalor PCM minyak kelapa terhadap beton, bata, dan air pada rentang temperatur 20-32 °C.....	39
Gambar 36	Model Masa Termal Internal berisi PCM	40
Gambar 37	Komposisi masa termal pada ruang uji.....	41
Gambar 38	Distribusi temperatur udara vertikal: (a) siang hari, (b) malam hari.....	42
Gambar 39	(a) Ilustrasi penyerapan <i>heat exchanger</i> PCM pada siang hari dan malam and (b) Ilustrasi pertukaran kalor. (Wonorahardjo, S.; Sutjahja, I.M.; Kurnia, D.; Fahmi, Z.; Putri, W.A., 2018)	43
Gambar 40	Ilustrasi pengaruh massa termal pada temperatur udara ruang (Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., 2018).....	44
Gambar 41	Hubungan pelingkup ruang dan profil temperatur udaranya.....	45
Gambar 42	Konsep Teknologi Berkelanjutan	47

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Sifat-sifat termal material bangunan	5
Tabel 2	Nilai kerapatan, konduktivitas termal, hambatan termal, dan kalor jenis dari beberapa material insulasi termal konvensional. Sumber: (Nieuwenhuyse, 2006), (Chaykovskiy, 2010) (TIASA, 2001)	17
Tabel 3	Beberapa kriteria pemilihan PCM untuk penyimpan energi (Khan, Z., Khan, Z., dan Ghafoor, A., 2016) (Khan M.M.A., Saidur R., Al-Sulaiman F.A., 2017).	35

1 LINGKUNGAN TERMAL BANGUNAN DAN PERKOTAAN

Secara umum sektor konstruksi bangunan memainkan peran penting pada perekonomian. Sebagai ilustrasi, di Cina industri semen, aspal dan mineral lainnya bernilai 5.092 juta dollar pada tahun 2022 (Statista, 2023). Teknologi material bangunan memiliki nilai strategis dalam perwujudan bangunan. Perkembangan teknologinya berdampak besar pada karakteristik bangunannya misalnya teknologi dinding *masonry* baik dari batu alam maupun batu buatan seperti bata merah yang banyak kita kenal, beton, dan beton ringan. Blok material penyusun dinding selalu menjadi komoditi perdagangan yang menghela perekonomian sehingga inovasinya selalu menjadi menarik dari masa ke masa.

1.1 Material Bangunan dan Lingkungan Termal

Perkembangan teknologi material bangunan berperan besar pada kualitas lingkungan binaan saat ini. Secara umum teknologi material bangunan didominasi oleh beton, baja, kayu, bata, kaca, alumunium karena sifat-sifat mekaniknya:

- a. Kapasitas bentangan yang lebar sehingga memungkinkan ruang-ruang yang luas pada gedung-gedung modern.
- b. Kekuatannya menahan gaya-gaya yang bekerja dalam pembebanan statik dan sementara.
- c. Dapat dibangun dengan cepat.
- d. Berpenampilan menarik atau dapat dibentuk sesuai keinginan.
- e. Secara ekonomi, nilainya terjangkau untuk pasarnya.

Material bangunan tersebut menjadi komoditi ekonomi dunia dan menghiasi wajah kota-kota besar di dunia. Kita dapat mengidentifikasi usia kawasan dari bahan-bahan yang digunakan. Kawasan perkotaan yang dibangun pada era dinding *masonry* atau dinding batu akan memiliki lingkungan termal yang berdeda dengan kawasan baru yang dibangun di era kaca sebagai dinding selubung bangunan.

Penggunaan material tersebut telah mengubah wajah alamiah permukaan bumi sehingga manusia harus mempelajari dampak perubahan yang terjadi. Semula inovasi bahan bangunan sebagai komoditi ekonomi yang menggiurkan karena berbagai keuntungan seperti kekuatan, kapasitas bentangan, kecepatan membangun hingga selera. Namun saat ini kita harus menyadari dampak penggunaan bahan bangunan pada lingkungannya baik langsung maupun tidak langsung, jangka pendek maupun jangka panjang (Gambar 1). Salah satu dampak penggunaan bahan bangunan berat (*heavyweight material*) seperti dinding bata adalah emisi kalornya. Pelepasan kalor ke udara menaikkan temperatur udara di sekitar bangunan. Kita tersadar bahwa iklim mikro lingkungan bangunan kita telah berubah.



Gambar 1 Komponen bangunan membentuk lingkungan termal kawasan perkotaan (digambar dengan bantuan AI)

1.2 Pemanasan Kawasan Perkotaan

Kenaikan temperatur udara di lingkungan perkotaan sudah lama dikenal. Luke Howard pada tahun 1818 dan 1820 (Howard, *The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations Made at Different Places in the Neighbourhood of the Metropolis. Volume 1., 1818*) (Howard, *The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations Made at Different Places in the Neighbourhood of the Metropolis. Volume 1., 1818*) (Howard, *The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations Made at Different Places in the Neighbourhood of the Metropolis. Volume 2., 1820*) pertama kali memperkenalkan fenomena *heat island* (HI). Kemudian dilanjutkan oleh tokoh-tokoh baru, yaitu Oke (Oke, 1982) dan Akbari (Akbari

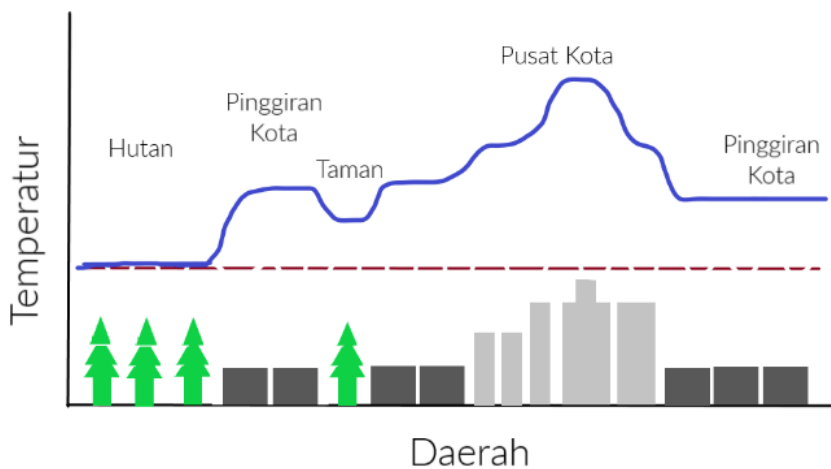
H., Pomerantz M., and Taha H., 2001). Fenomena ini diidentifikasi melalui perbandingan temperatur udara di daerah terbangun dengan daerah yang tak terbangun (Gambar 2).

UHI dapat juga dirumuskan sebagai berikut:

$$UHI = \Delta T_{k-d} \quad (1.1)$$

dengan T_k adalah temperatur udara kota dan T_d adalah temperatur udara desa.

Identifikasi penyebab fenomena tersebut telah dilakukan oleh para ahli lingkungan dari bidang geografi, meteorologi, perencanaan wilayah, rancang kota hingga arsitektur bangunan.



Gambar 2 Profil temperatur udara di daerah urban dan sub-urban.

Perubahan *land use land cover* (LULC) perkotaan dapat diidentifikasi melalui citra satelit. Melalui citra landsat band 6 menunjukkan citra infra merah yang membedakan permukaan kota yang mengemisikan infra merah dan yang tidak. Badan jalan, perkerasan, dinding bangunan dan atap beton terlihat berwarna merah atau mengemisikan kalor, sedangkan tanaman atau vegetasi tidak berwarna merah (Gambar 3). Para ahli telah merumuskan korelasi yang kuat antara emisi infra merah dari penggunaan berbagai bahan bangunan berat pada perkerasan kota dengan kenaikan temperatur udara perkotaan. Fenomena pemanasan kawasan kota yang didasarkan pada temperatur permukaan kota dikenal dengan istilah *surface urban heat island* (SUHI).



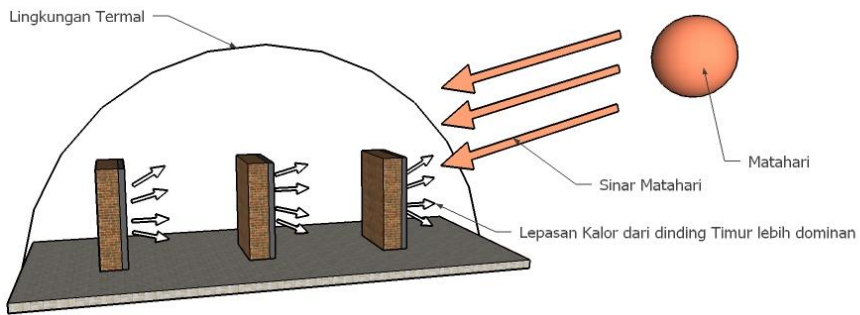
Gambar 3 Contoh *visible image* (kiri) and *thermal infrared image* (kanan). Sumber: <https://coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2012/04/IR-baton-rouge.jpg>

Kajian sifat termal material bangunan menjadi penting karena dampaknya dapat mengubah iklim mikro perkotaan, memicu cuaca ekstrem seperti angin ribut, hujan es, banjir lokal, hingga konsumsi energi untuk pengondisian udara ruang. Kerusakan lingkungan termal bangunan dan kawasan perkotaan bersifat relatif ‘menetap’ atau sulit dipulihkan dalam waktu singkat, karena bangunan kota sudah jadi dan sulit diintervensi dalam periode waktu yang singkat.

Lebih lanjut, karakteristik termal material bangunan baik *surface characteristic*, yaitu albedo, warna tekstur, maupun *bulk characteristic* yaitu *thermal conductivity*, *specific heat* dan *density* merupakan sifat-sifat penting yang harus dipahami oleh para perencana, arsitek, dan pemangku kebijakan pembangunan untuk dapat mengendalikan lingkungan termal bangunan dan kawasan perkotaan.

1.3 Karakterisasi Material Bangunan dan Kawasan Perkotaan

Sifat-sifat material bahan bangunan menjadi penting karena penggunaan yang masif melingkupi wilayah kota yang luas (Tabel 1). Sifat material tersebut mencerminkan sifat termal kawasan kotanya. Selain itu material pada dinding timur dan barat juga berperan penting dalam serapan dan lepasan kalor, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Proses penangkapan radiasi matahari yang menyebabkan pemanasan lingkungan (Wonorahardjo, 2012).

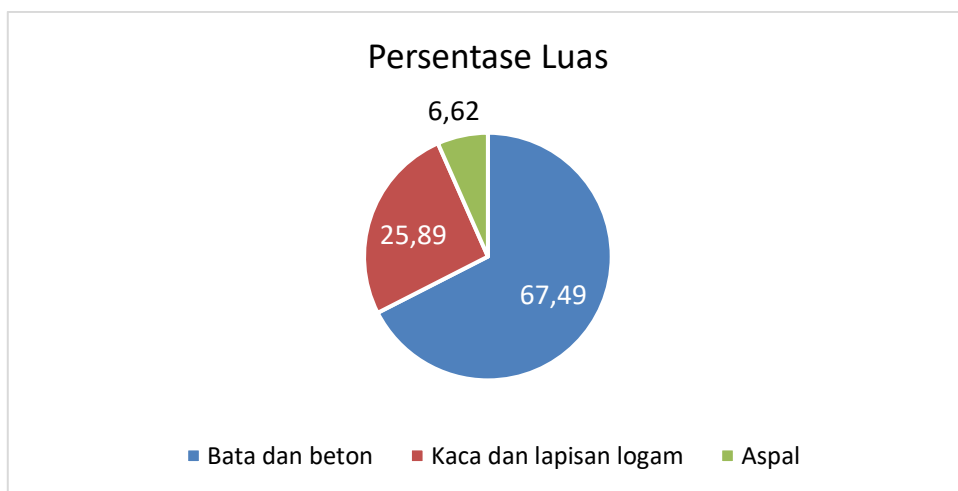
Penggunaan batu, bata, dan beton membuat bangunan dan kawasan perkotaan menjadi *hardscape*. Ketebalan material dinding dan perkerasan berarti mampu menyimpan banyak energi termal dari sinar matahari atau disebut masa termal. Dengan demikian kawasan perkotaan berlaku sebagai *thermal reservoir* yang menerima energi saat siang hari dan melepaskannya kembali ke udara pada sore dan malam hari.

Tabel 1 Sifat-sifat termal material bangunan

Material Bangunan	Densitas ρ (kg/m ³)	Ref.	Kalor Jenis c (J/(kg·K))	Ref.	Konduktivitas Termal k (W/(m·K))	Ref.
Bata	1600–1800	(Bennett, 2010)	879–974	(Bennett, 2010)	~0,60–0,73	(Yehuda, 2003)
Beton/cement plaster	2000	(Bennett, 2010)	880	(Bennett, 2010)	0,61	(Yehuda, 2003)
Aluminium Composite Panel (ACP)	2700	Davis (Davis J.R. (editor), 1999)	-		0,4	(http://qbo.nd.co/images/SpecsPE.pdf , n.d.)
Low-E glass	2180	(Nam J., Ryou H.-S., Kim D.-J., Kim S.-W., Nam J.-S., Cho S., 2015)	750	(Nam J., Ryou H.-S., Kim D.-J., Kim S.-W., Nam J.-S., Cho S., 2015)	1,38	(Nam J., Ryou H.-S., Kim D.-J., Kim S.-W., Nam J.-S., Cho S., 2015)

Material Bangunan	Densitas ρ (kg/m ³)	Ref.	Kalor Jenis c (J/(kg·K))	Ref.	Konduktivitas Termal k (W/(m·K))	Ref.
Clear glass	2200	(Storm, 2004)	800	(https://www.koppglass.com/blog/glass-thermal-properties-and-their-role-product-design, 2015)	1,0	(https://www.koppglass.com/blog/glass-thermal-properties-and-their-role-product-design, 2015)

Beton dan bata merupakan bangunan yang paling populer digunakan karena diyakini kekuatannya dan daya tahannya (Gambar 5). Dinding bata dan beton menyerap kalor pada pagi hari memberikan efek sejuk yang disukai, namun pada sore hari hingga malam dinding tersebut melepas kalor sehingga efek pemanasan yang tak disadari berasal dari material tersebut.



Gambar 5 Proporsi penggunaan bahan bangunan per 100 m² di kawasan perkotaan di Bandung (Wonorahardjo, 2012).

Hasil kajian penggunaan bahan bangunan di kawasan perkotaan di Bandung menunjukkan bata dan beton paling banyak jauh di atas penggunaan kaca dan *metal sheet*. Aspal termasuk tiga besar material yang digunakan di perkotaan yang berkontribusi pada pemanasan lingkungan.



Gambar 6 Citra *visible* (kiri) dan *thermal infrared* (kanan). Dinding bata, genteng dan aspal merupakan komponen yang mengemisikan kalor. (Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., 2018)

Efek penggunaan material pada lingkungan termalnya dapat dilihat langsung menggunakan kamera infra merah. Gambar 6 menunjukkan aspal memancarkan infra merah ke lingkungannya. Demikian juga dengan dinding timur dan atap yang terkena sinar matahari. Area dinding yang tidak terkena sinar matahari (sisi selatan) dan badan jalan yang terbayangi memiliki temperatur permukaan yang lebih rendah.

Bata dan beton merupakan massa termal, merupakan sistem penyimpan kalor sensibel yang menunjukkan besar kepemilikan kalor dengan perubahan nilai temperaturnya pada proses serapan dan lepasan kalor. Kinerja masa termal beton dan bata bergantung pada kapasitas kalor material material tersebut. Pada sistem penyimpanan kalor sensibel, penyimpanan energi berlangsung melalui kenaikan dan penurunan temperatur material. Besarnya kalor (Q) yang dapat disimpan pada sistem penyimpanan kalor sensibel ini bergantung pada massa material (m), besarnya kalor jenis (c_p), dan perubahan temperatur yang merupakan selisih antara temperatur awal (T_i) dan temperatur akhir (T_f) dari material,

$$Q = mc_p(T_f - T_i) \quad (1.2)$$

2. PENGENDALIAN LINGKUNGAN TERMAL PERKOTAAN

Fenomena pemanasan lingkungan perkotaan telah lama dikenal, demikian juga dengan penyebabnya. Saat ini belum ada teknologi untuk mengendalikan intensitas UHI di perkotaan yang efektif dan rasional untuk dilaksanakan. Pendinginan mekanis untuk perkotaan hampir tidak mungkin dilakukan sehingga pendekatan desain pasif merupakan jalan termudah untuk dilaksanakan.

Banyak pakar menghubungkan rekayasa selubung bangunan berpengaruh pada kualitas iklim mikronya terutama untuk ruang dalam. Belum banyak pakar yang membahas efek rekayasa selubung bangunan pada ruang luarnya.

Beberapa konsep selubung yang banyak diterapkan adalah penyimpanan kalor, insulasi termal, pembayangan sinar matahari, pemantulan sinar matahari, dan konversi energi. Berbagai upaya pengembangan teknologi pengendalian lingkungan termal kawasan serta evaluasinya dibahas di bawah ini.

2.1 Konsep Penyimpanan Kalor

Upaya memperoleh lingkungan termal yang lebih nyaman, terutama untuk ruang dalam, dilakukan melalui penambahan masa termal pada dinding selubung bangunan. Para ahli melaporkan adanya efek penurunan temperatur udara ruang siang hari, namun efek pelepasan kalor tidak dilaporkan secara eksplisit pada sore dan malam hari. Penurunan temperatur udara pada ruang yang dindingnya menggunakan *heavyweight material* dapat dipahami karena radiasi matahari yang diterima dinding selubung tidak langsung diteruskan ke dalam ruang tetapi disimpan pada dinding sehingga temperatur udara ruang dalam dapat dijaga tetap rendah seperti diilustrasikan pada Gambar 7. Salah satu upaya untuk meningkatkan efek penyimpanan kalor adalah penambahan masa termal dengan memasukkan PCM ke dalam dinding bata yang terbukti meningkatkan efek tunda (*time lag*) aliran kalor ke ruang dalam.

Efek tunda pada proses perpindahan kalor di dalam dinding bata dipahami sebagai perlindungan saat sinar matahari sudah memanaskan sisi luar dinding tetapi sisi dalam dinding masih dingin.

Rumus eksplisit untuk menyimulasikan kinerja perpindahan kalor dinding bangunan didasarkan pada persamaan perpindahan kalor satu dimensi (Lewis, R.W., Morgan, K., Thomas, H.R., Seetharamu, K.N., 2013),

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

dengan α adalah difusivitas termal, yang didefinisikan dalam hubungannya dengan konduktivitas termal (k), densitas (ρ), dan kalor jenis (c) material sebagai (Lewis, R.W., Morgan, K., Thomas, H.R., Seetharamu, K.N., 2013) (Kreith, F., Manglik, R.M., Bohn, M.S., 2011)

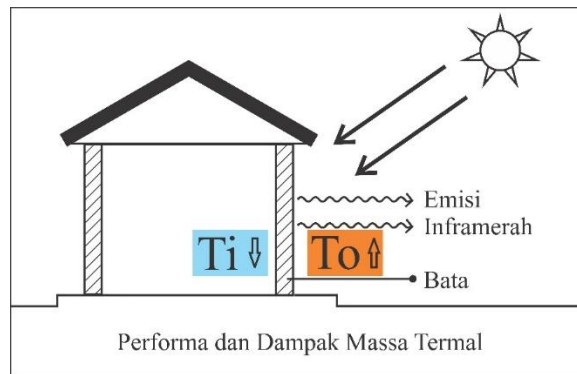
$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (2.2)$$

Secara praktis difusivitas termal menjelaskan kemampuan material untuk mengonduksi energi termal relatif terhadap kemampuannya untuk menyimpan energi termal tersebut:

Intervensi pada kemampuan dinding bata dalam menyimpan dan mengonduksi energi termal dilakukan terutama untuk pengondisian temperatur ruang dalam pada saat siang hari. Namun semakin banyak kalor yang disimpan semakin banyak juga kalor yang akan dilepaskannya. Pada Gambar 7 diperlihatkan efek pelepasan kalor dari dinding terjadi untuk ruang luar. Dapat dikatakan bahwa konsep ini memiliki kelemahan karena selain sebagai masa termal yang menunda aliran kalor masuk lewat selubung, dinding tersebut justru bekerja sebagai *thermal collector* yang akan memanaskan ruang luar.

Dapat disimpulkan, bahwa konsep penyimpanan kalor melalui aplikasi material bata dan beton tidak tepat karena menimbulkan fenomena *urban heat island*. Efek pelepasan kalor dinding bata dan material penutup dan perkerasan di permukaan kota teridentifikasi hingga subuh esok harinya. Intensitas tertinggi UHI terjadi pada malam hari, tetapi efek pada siang hari sudah menyebabkan konsumsi energi yang berlebihan untuk penyejukan udara ruang.

Gedung-gedung dan kota sudah terbangun, batu bata dan beton sangat banyak dipakai di seluruh permukaan kota. Bangunan dan kota membutuhkan mitigasi agar intensitas UHI dapat dikendalikan. Kondisi ini merupakan tugas baru bagi arsitek, perencana dan pemangku kebijakan pembangunan untuk memitigasi efek negatifnya serta mengembangkan teknologi pengendali lingkungan termal yang baru dan ramah lingkungan serta lebih menjamin berkelanjutan ekosistem kita.



Gambar 7 Dinding bata konvensional memberi dampak pada lingkungan termal

Salah satu konsep yang dipelajari potensinya untuk menggantikan konsep penyimpanan kalor adalah konsep insulasi termal.

2.2 Konsep Insulasi Termal

Sama dengan konsep penyimpanan kalor, konsep insulasi termal juga diawali untuk kepentingan ruang dalam. Para ahli menggunakan konsep insulasi termal pada dinding untuk menghambat aliran kalor dari luar ke dalam sehingga beban pendinginan ruang berkurang (Gambar 8). Kemampuan menghambat aliran kalor oleh material dinding dipandang sebagai potensi untuk memperbaiki temperatur ruang dengan banyaknya energi termal (q) tergantung pada nilai U dan beda temperatur (ΔT) untuk aliran kalor tersebut,

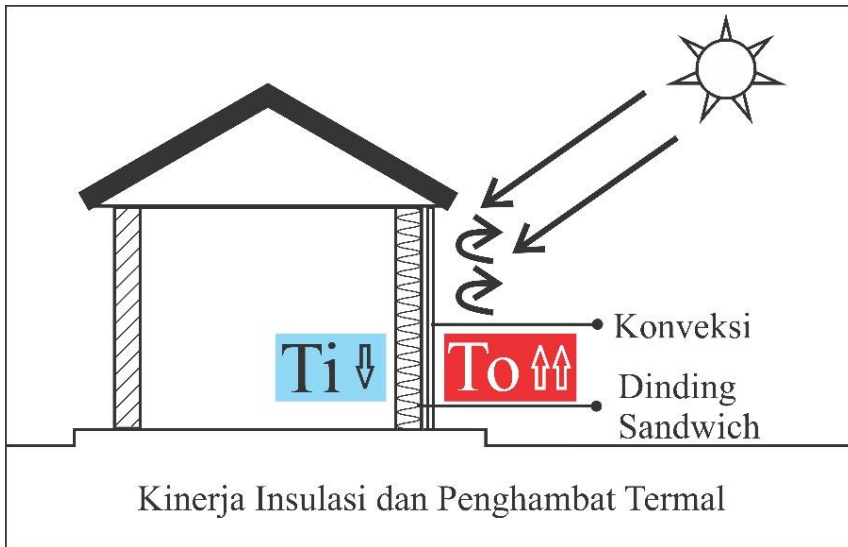
$$q = U\Delta T \tag{2.3}$$

U -value dirumuskan berbanding terbalik dengan nilai hambatannya (R -value)

$$U = \frac{1}{R} \tag{2.4}$$

Nilai hambatan R dipahami berperan penting untuk menghambat aliran kalor dari sisi luar dinding yang terpapar sinar matahari ke sisi dalam dinding sehingga temperatur udara di dalam ruang tetap dapat dipertahankan sejuk (Gambar 8).

Namun penelitian ini belum lengkap, sangat sedikit publikasi yang melaporkan efek penggunaan insulasi termal tersebut pada kualitas termal ruang luarnya.



Gambar 8 Insulasi melindungi ruang dalam tetapi berdampak buruk pada ruang luar.

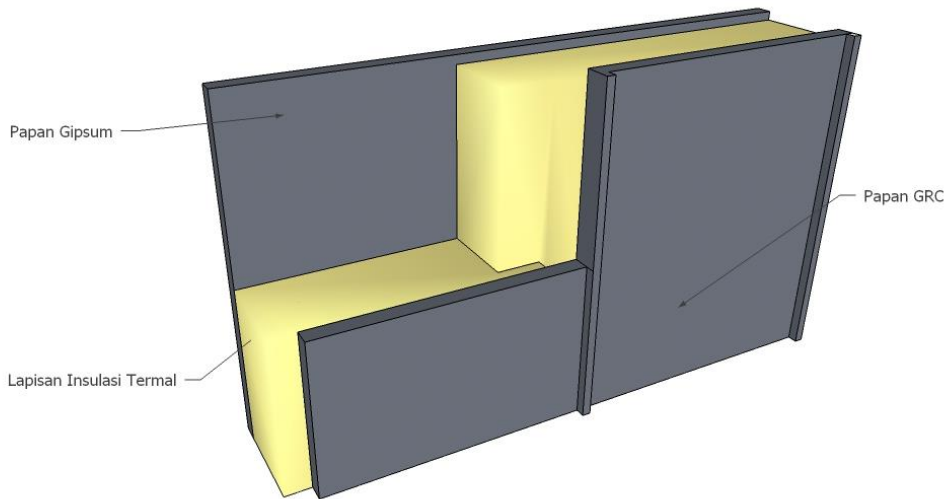
Pengembangan dinding berinsulasi seperti *sandwich wall* seperti diilustrasikan pada Gambar 9, dipandang berpotensi berkontribusi positif pada penurunan beban pendinginan AC. Rancangan *U value* untuk *sandwich wall* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$U_{\text{sand wall}} = \frac{1}{R_p + R_{\text{ins}} + R_p} \quad (2.5)$$

di mana R_p dan R_{ins} adalah hambatan papan gypsum atau GRC dan hambatan bahan insulasi yang digunakan.

Oleh karena itu, kajian efek penggunaan *sandwich wall* dengan material insulasi di tengahnya sangat dibutuhkan karena sudah mulai populer digunakan masyarakat. Pada kajian tersebut kinerja dinding bata dan dinding

sandwich, dengan insulasi *glasswool*, dibandingkan dalam paparan sinar matahari selama 4 jam (pukul 08.00 – 12.00) dan didinginkan (pukul 12.00-16.00). Pengukuran lapangan dan simulasi digital dilakukan untuk melihat aliran kalor pada penampang dinding. Hasil pengukuran dan simulasi menunjukkan bahwa dinding bata menyerap dan meneruskan kalor ke sisi dalam dinding pada periode pemanasan dan melepaskan kalor ke sisi luar dan dalam pada periode pendinginan.

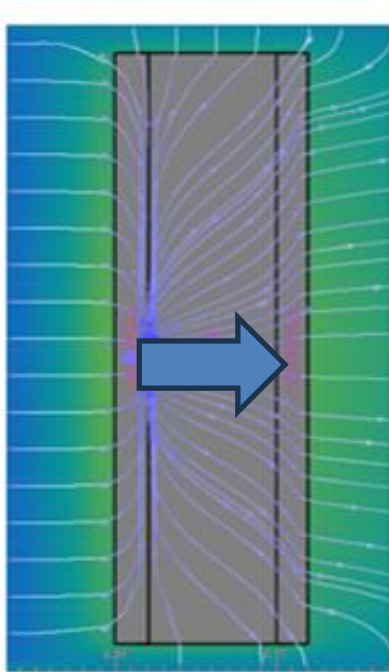


Gambar 9 Model *Sandwich Wall*.

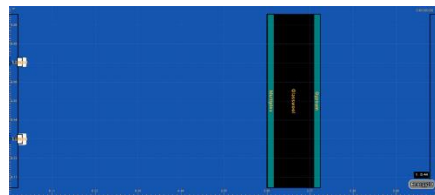
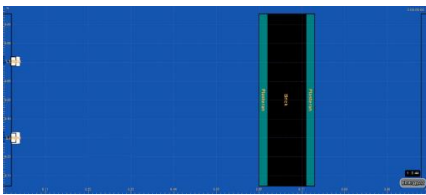
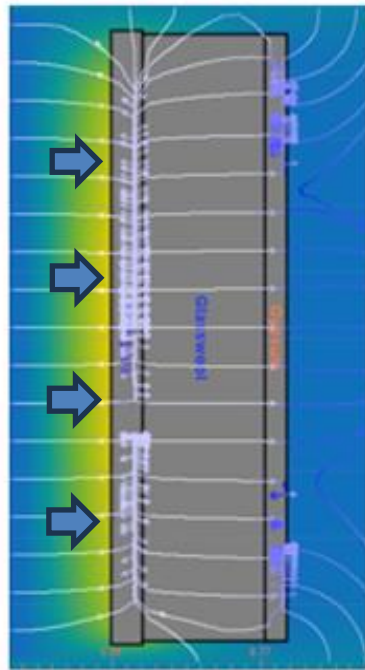
Berbeda dengan dinding bata, *insulated sandwich wall* (Gambar 9) menghambat aliran kalor melewati penampang dinding pada periode pemanasan dan menyebabkan kenaikan temperatur permukaan dinding secara signifikan (Gambar 10). Fenomena *overheating skin* ini menyebabkan temperatur udara di dekat permukaan dinding *sandwich* meningkat secara drastis (Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., Mardiyati Y., Andoni H., Thomas D., Achsani R.A., Steven S., 2020).

Kajian ini menunjukkan penerapan konsep insulasi pada dinding selubung berhasil menjaga temperatur ruang dalam tidak terpengaruh oleh lingkungan luar dan menurunkan beban pendinginan AC, tetapi efek insulasi tersebut justru membuat permukaan luar selubung mengalami fenomena *overheating* yang menyebabkan pada naiknya temperatur udara luar.

Dinding Bata



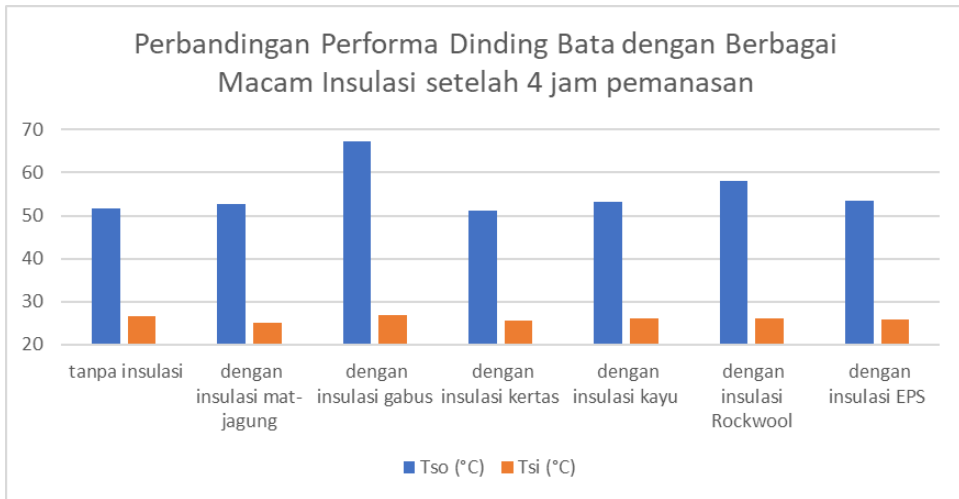
Dinding Sandwich



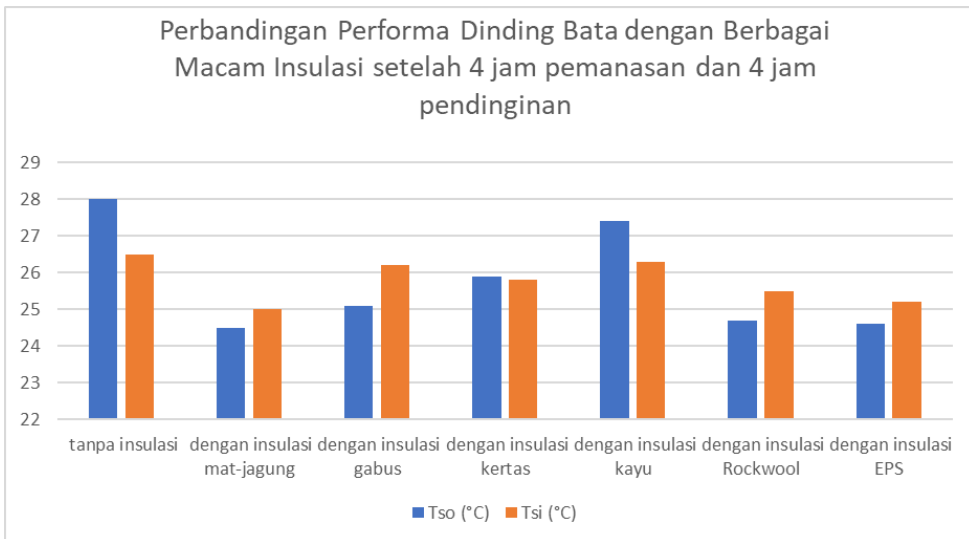
Gambar 10 Simulasi aliran kalor pada penampang dinding bata dan *sandwich* (Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., Mardiyati Y., Andoni H., Thomas D., Achسانی R.A., Steven S., 2020)

Gambar 11 menunjukkan hasil simulasi nilai temperatur permukaan luar (*outside surface temperature, T_{so}*) dan temperatur permukaan dalam (*inside surface temperature, T_{si}*) dari dinding bata dengan berbagai jenis insulasi setelah pemanasan selama 4 jam dilanjutkan dengan pendinginan selama 4 jam.

Penerapan konsep dinding berinsulasi ini pada kawasan secara luas menyebabkan intensitas UHI semakin buruk (Gambar 12).

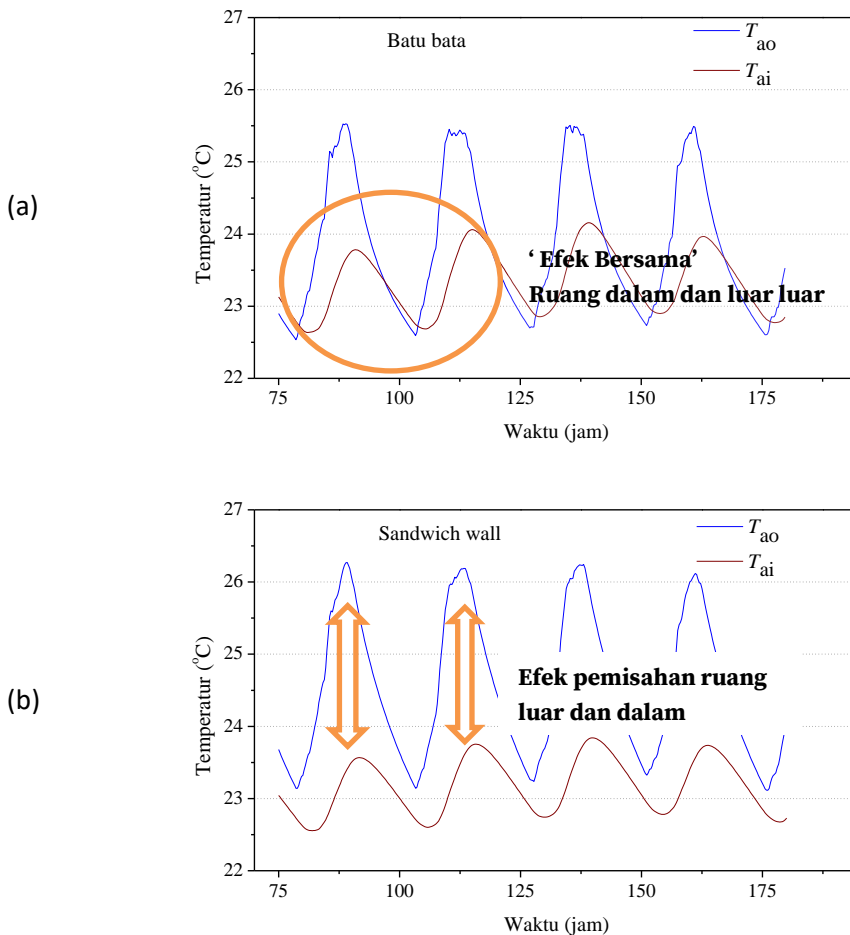


(a)



(b)

Gambar 11 Hasil simulasi berbagai jenis dinding dengan insulasi setelah: (a) 4 jam; (b) 8 jam.

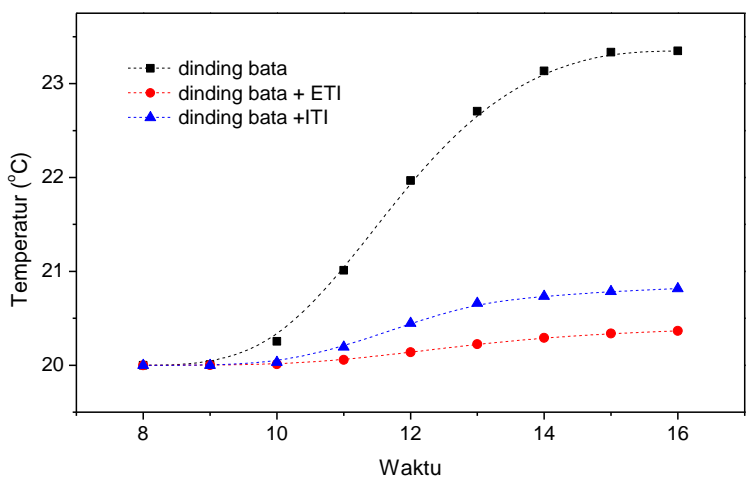


Gambar 12 Simulasi efek penggunaan dinding bata dan *sandwich wall* pada ruang dalam dan luar.

Posisi insulasi sangat menentukan kinerja dinding. Pada *sandwich wall* insulasi diletakkan di tengah dinding dan merupakan sebagian besar ketebalan dinding (Gambar 9). Formasi ini adalah yang paling umum dan lazim dikenal oleh masyarakat. Variasi pada *sandwich wall* pada umumnya pada kerapatan insulasi, ketebalan dan jenis materialnya. Selain itu panil sisi luar dan dalam *sandwich wall* juga sangat beragam. Umumnya sisi luar menggunakan panil yang tahan air dan sinar matahari seperti *glassfiber reinforced cement* atau GRC, atau panil metal komposit. Penggunaan panil kayu lapis dan *gypsum* umumnya hanya untuk sisi dalam dinding yang tidak terpapar air hujan dan sinar matahari.

Inovasi penggunaan insulasi pada dinding bata tidak banyak dibahas karena umumnya dinding bata dianggap sudah berperan baik melindungi ruang dari paparan sinar matahari dan pertukaran kalor secara berlebihan.

Pelapisan dinding bata pada sisi luar (*external thermal insulation, ETI*) untuk mengurangi simpanan kalor dari sinar matahari ternyata berdampak pada tingginya temperatur permukaan insulasi dan memengaruhi iklim mikro di sekitar bangunan, tetapi penerapan di sisi luar tersebut mampu menurunkan temperatur udara dalam secara signifikan.



Gambar 13 Efek insulasi sisi dalam dan sisi luar dinding bata terhadap temperatur udara ruang.

Sebaliknya penggunaan insulasi di sisi dalam dinding (*internal thermal insulation, ITI*) memberikan perbaikan signifikan pada temperatur udara ruang seperti ditunjukkan pada hasil simulasi pada Gambar 13. Penerapan konsep insulasi pada sisi dalam dinding bata berpotensi mengurangi beban pendinginan AC dan oleh karenanya mengurangi konsumsi energi listrik. Namun sebaliknya, hambatan pada lepasan kalor ke ruang dalam, menyebabkan lepasan kalor ke ruang luar menjadi lebih besar.

Oleh karena itu, penerapan konsep insulasi tersebut masih membutuhkan banyak kajian untuk menghasilkan konsep pengelolaan kalor pada kulit bangunan yang paling tepat.

Berbagai material insulasi termal yang umum digunakan sebagai bahan bangunan dapat dilihat pada Tabel 2. *Glasswool* dan *rockwool* merupakan bahan yang paling banyak digunakan untuk dinding dan atap.

Tabel 2 Nilai kerapatan, konduktivitas termal, hambatan termal, dan kalor jenis dari beberapa material insulasi termal konvensional. Sumber: (Nieuwenhuysse, 2006), (Chaykovskiy, 2010) (TIASA, 2001)

Jenis material insulasi	Densitas (kg/m ³)	Konduktivitas termal (W/m·K)	Hambatan termal pada 100 mm (K.m ² /W)	Kalor jenis (J/kg·K)
<i>Glass mineral wool</i>	20	0,035	2,85	1030
<i>Mineral Rock wool</i>	81–99	0,043–0,047		780–820
<i>Expanded polystyrene (EPS)</i>	15–30	0,034–0,038	3,52	1300
<i>Extruded polystyrene (XPS)</i>	20–40	0,033-0,035	3,0	–
Serat kayu	50–160	0,038	2,5–2,6	2100
Selulosa	27–65	0,035–0,040	2,632	2020
<i>Polyurethane (PU)</i>	30	0,025	–	1500

Asdrubali dkk. (Asdrubali F., Alessandro F. D., Schiavoni S., 2015) memberikan *review* berbagai jenis material insulasi non-konvensional dari bahan alam dan biomassa, seperti tanaman alang-alang, tebu, cattail, bongkol jagung, tangkai kapas, kurma, durian, kelapa sawit, dan daun nanas. Bahan-bahan alami memiliki nilai tambah pada nilai keberlanjutan material sehingga disarankan sebagai alternatif untuk bahan konvensional.

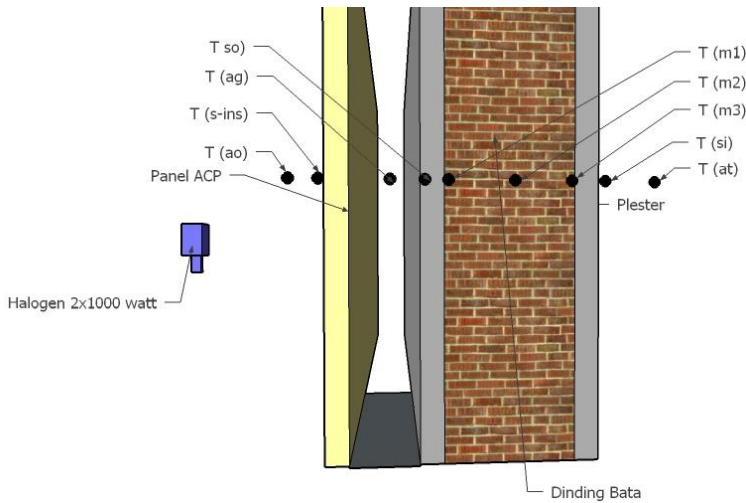
Selain konsep insulasi, konsep teknologi kulit bangunan yang banyak diteliti untuk mengendalikan kualitas lingkungan termal bangunan dan kawasan adalah konsep pengurangan perolehan kalor melalui teknik pembayang, pemantul, pengurangan masa termal, dan pendinginan konvektif.

2.3 Konsep Pembayangan

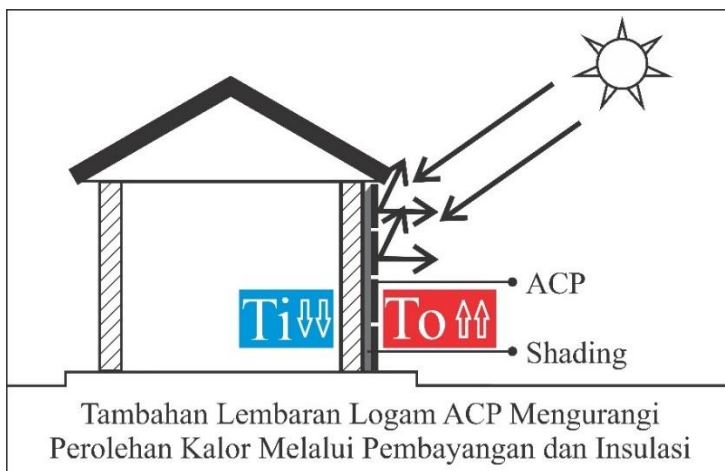
Konsep pembayangan merupakan konsep paling tua dikenal oleh masyarakat dan hingga kini masih relevan diterapkan pada bangunan. Berbagai bentuk pembayang mulai dari pembayang vegetasi berupa pohon besar atau oleh bangunan lain hingga *self shading* yang menempel pada bangunan berupa teritisan hingga *double skin façade* (Gambar 14).

Pengurangan perolehan kalor pada dinding melalui penambahan lapisan metal tipis seperti ACP (*Aluminium Cladding Panel*) sangat populer pada bangunan-bangunan modern (Gambar 15). Lapisan ini memberikan tampilan modern yang disukai masyarakat. Selain itu lapisan lembaran metal ini melindungi bata dari paparan sinar matahari langsung. Efek pembayangan ini

menurunkan perolehan kalor pada dinding bata atau beton, tetapi permukaan panil aluminium meningkat temperturnya secara signifikan dan memengaruhi udara di sekitar gedung (Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., Mardiyati Y., Andoni H., Achsani R.A., Steven S., Thomas D., Tunçbilek E., Arıcı M., Rahmah N., Tedja S., 2022). Kenaikan temperatur permukaan ACP pada pagi dan sore hari bahkan lebih tinggi dari dinding bata tanpa pelindung ACP (Gambar 16).



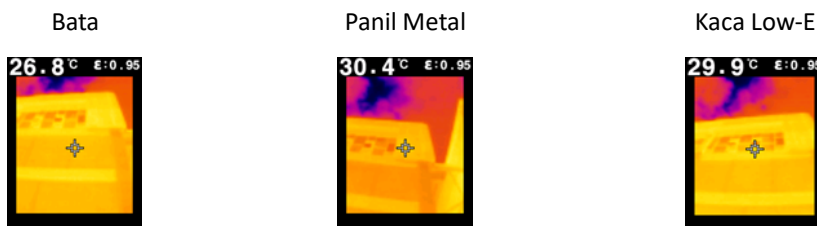
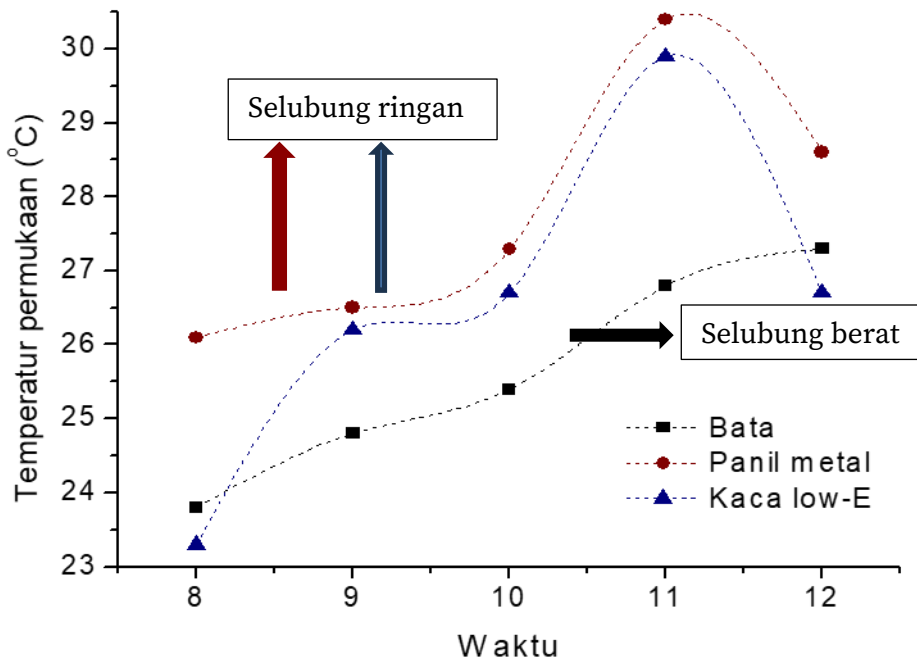
Gambar 14 Lapisan panil pembayang pada permukaan dinding bata berperan seperti insulasi



Gambar 15 Lapisan panil di depan dinding melindungi dinding bata dan ruang dalam

Serupa dengan konsep insulasi termal, pembayangan menggunakan panil logam tipis seperti ACP berperan seperti insulasi. Penghambatan sinar matahari oleh *metal sheet* menyebabkan kalor terkumpul pada panil tersebut sehingga temperatur permukaannya meningkat drastis dan ikut berkontribusi pada pemanasan udara di sekitar dinding.

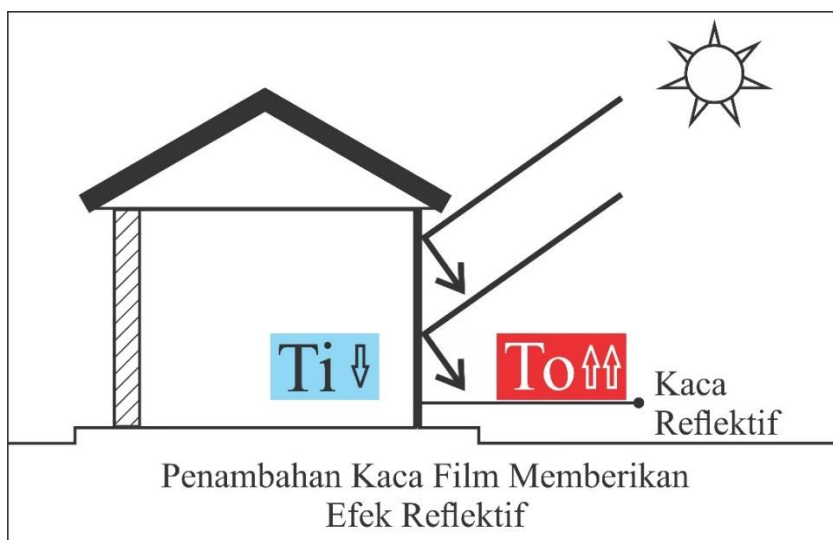
Pada gambar 16 diilustrasikan bahwa selubung ringan seperti kaca dan panil metal bertemperatur permukaan lebih tinggi dibandingkan selubung berat seperti dinding bata. Upaya memberikan perlindungan pada dinding bata dengan menggunakan panil metal hanya berkontribusi pada temperatur ruang dalam tetapi tidak untuk ruang luar. Penerapan konsep pembayang metal tipis belum memberikan solusi pengendalian intensitas *urban heat island*.



Gambar 16 Perbandingan temperatur permukaan ACP, dinding bata, dan *low-E glass*

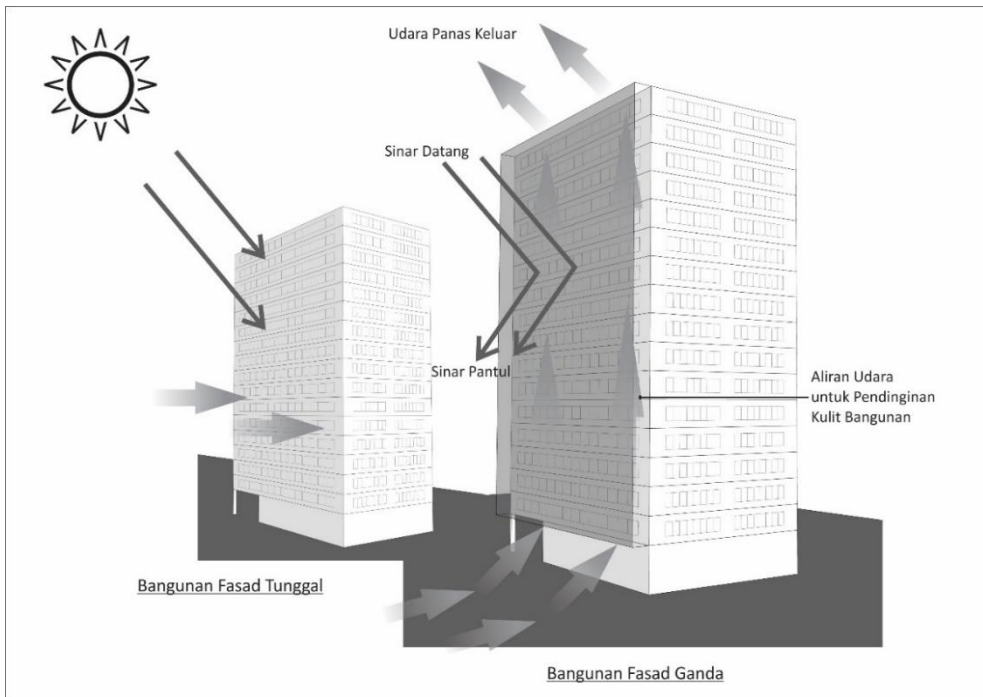
2.4 Konsep Pengurangan Masa Termal (Selubung Ringan)

Konsep pengurangan efek masa termal dengan menggunakan kulit tipis pada bangunan juga banyak dikaji oleh para pakar. Dinding kaca sangat populer karena produsen kaca memberikan banyak pilihan sifat-sifat termal kaca. Perkembangan teknologi pelapisan pada kaca (kaca film) banyak memperbaiki sifat-sifat kaca terutama untuk menurunkan masuknya radiasi langsung ke dalam ruang dengan cara meningkatkan nilai absorptansi dan reflektansi kaca. Walaupun teknologi kaca sudah semakin maju, namun kinerjanya terhadap temperatur udara *indoor* belum dapat bersaing dengan dinding bata. Absorpsi kalor pada kaca menyebabkan temperatur permukaan kaca meningkat tajam bila terpapar sinar matahari dibandingkan kaca bening (*clear glass* dan *low iron glass*). Efek pemanasan kaca juga memengaruhi udara di sekitar baik di sisi luar maupun dalam (Gambar 17). Kaca sebagai dinding tipis dengan masa termal kecil sensitif pada paparan sinar matahari. Setelah paparan sinar matahari menghilang temperatur kaca segera turun. Berbeda dengan dinding bata dan beton yang temperatur dan emisi kalor (IRE) masih tinggi saat paparan sinar matahari sudah hilang.



Gambar 17 Selubung kaca

Selubung kaca sangat populer karena proses konstruksi cepat dan memberikan penampilan menarik. Namun selubung ringan dan tipis ini sensitif pada perubahan temperatur udara luar. Beberapa rekayasa selubung bangunan dilakukan oleh para arsitek, antara lain memberikan kulit kedua (fasad ganda) pada bangunan, seperti diilustrasikan pada Gambar 18.



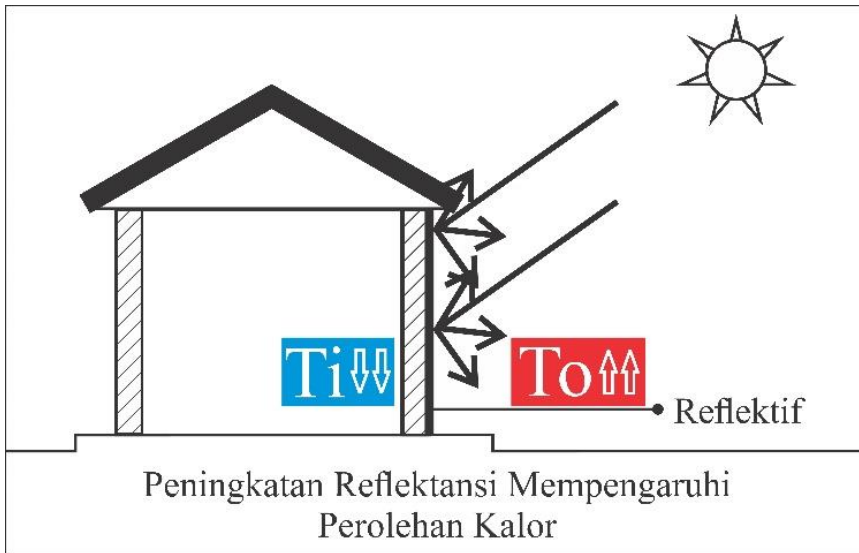
Gambar 18 Perbandingan bangunan dengan fasad tunggal dan fasad ganda

Para peneliti juga melaporkan upaya pengurangan perolehan kalor dengan menerapkan melalui konsep pemantulan. Lapisan *reflective coating* terbukti menurunkan efek masa termal pada dinding beton dan bata. Namun efek ini berperan banyak bila dinding terpapar sinar matahari langsung.

2.5 Konsep Pemantulan

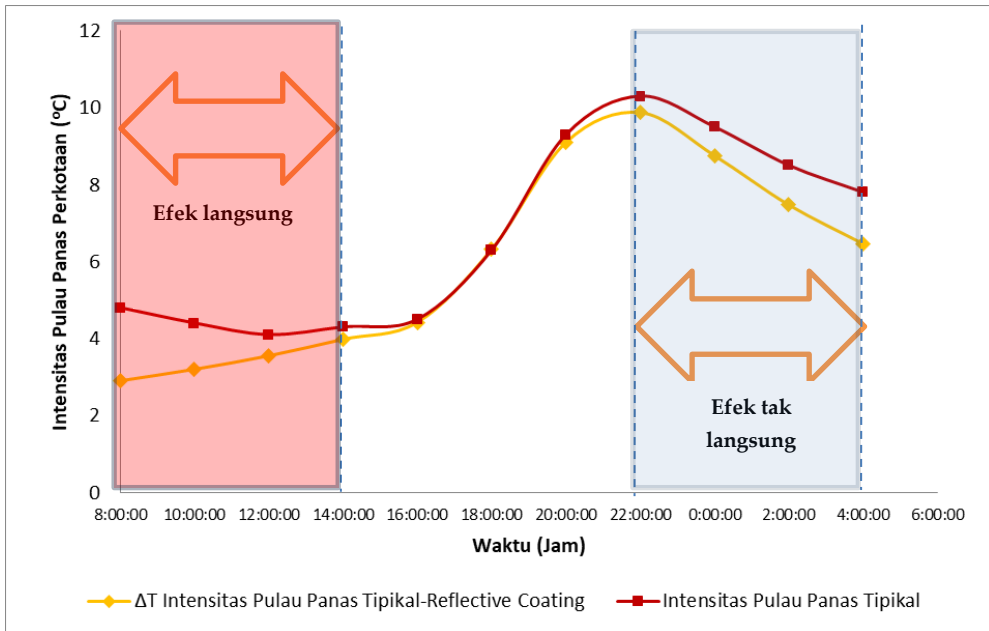
Sejalan dengan *reflective coating* yang ditambahkan pada permukaan kaca untuk mengurangi transmisi gelombang elektromagnetik masuk ke dalam ruang. Pada satu sisi, pengurangan nilai transmitansi kaca menurunkan *cooling load AC*, di sisi lain efek dari lapisan pemantul menaikkan temperatur kaca (Gambar 19) dan udara sekitar kaca. Intervensi ini menguntungkan untuk ruang dalam. Demikian juga upaya pemberian *double skin façade* pada kaca dan efek *shading* dan *convective cooling* pada permukaan kaca lebih berorientasi pada penurunan *cooling load* pada ruang dalam. Belum banyak kajian yang melaporkan efeknya pada *microclimate* di sekitar bangunan yang menerapkan teknologi ini (Gambar 19). Kajian *reflective coating* berkembang cukup luas dengan berbagai campuran material untuk memperoleh

kemampuan memantulkan sinar matahari tetap dalam bentuk gelombang pendek yang dapat lepas ke angkasa secara langsung.



Gambar 19 Penambahan lapisan reflektansi menurunkan simpanan kalor pada dinding

Efek penerapan konsep pemantulan pada dinding bata belum banyak diteliti. Ornam dkk. (Ornam K., Wonorahardjo S., Triyadi S., 2024) melakukan penelitian penambahan lapisan *reflective coating* menunjukkan adanya penurunan perolehan kalor pada dinding bata. Efek terlihat pada pagi hari saat sinar matahari diterima permukaan dinding. Efek penurunan perolehan kalor ditunjukkan dengan turunnya emisi kalor pada malam hingga subuh (Gambar 20). Hasil kajian tersebut menunjukkan efek langsung lapisan pemantul pada penurunan intensitas UHI pada pagi hingga tengah hari. Efek langsung tersebut dipengaruhi oleh kualitas material pemantul. Pemantulan yang baik tidak memburkan energi termal ke lingkungan sekitarnya sehingga efek langsung pemantulan pada intensitas UHI cukup besar. Lapisan pemantul juga memberikan efek tidak langsung dari pengurangan simpanan kalor pada dinding bata, yang efeknya terlihat setelah Tengah malam hingga subuh. Konsep ini menjawab kebutuhan mitigasi intensitas UHI yang dibutuhkan. Teknologi ini relatif murah dan efektif untuk mengendalikan intensitas UHI.



Gambar 20 Efek langsung dan tak langsung pada penurunan temperatur udara pada penerapan konsep pemantulan

2.6 Konsep Konversi Energi

Teknologi konversi energi merupakan masa depan bagi selubung bangunan. Konsep ini yang paling tepat untuk teknologi pengelolaan kalor pada selubung bangunan karena energi yang diperoleh tidak terburai di udara.

Teknologi konversi sangat menjanjikan di masa mendatang di mana sinar matahari merupakan sumber energi yang berkelanjutan. Untuk wilayah tropis, kekayaan sinar matahari ini sangat menguntungkan.

Salah satu teknologi konversi energi yang saat ini populer adalah *green wall*, di mana energi dari matahari dikonversi dalam proses *photosynthesis* pada daun. Teknologi ini cukup efektif untuk menekan UHII (Gambar 21). Berdasarkan kajian Ornam dkk. pada tahun 2024 (Ornam K., Wonorahardjo S., Triyadi S., 2024), *green wall* dapat menurunkan UHII hingga sekitar 11-12 % setara dengan konsep pemantulan.

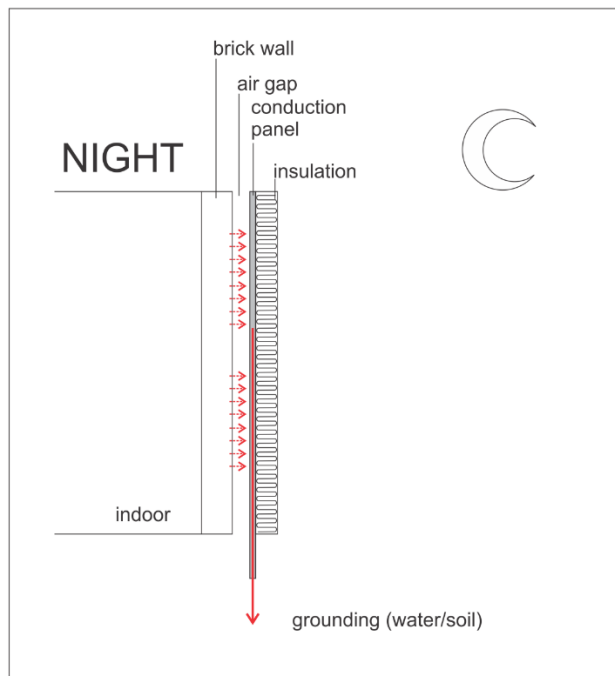
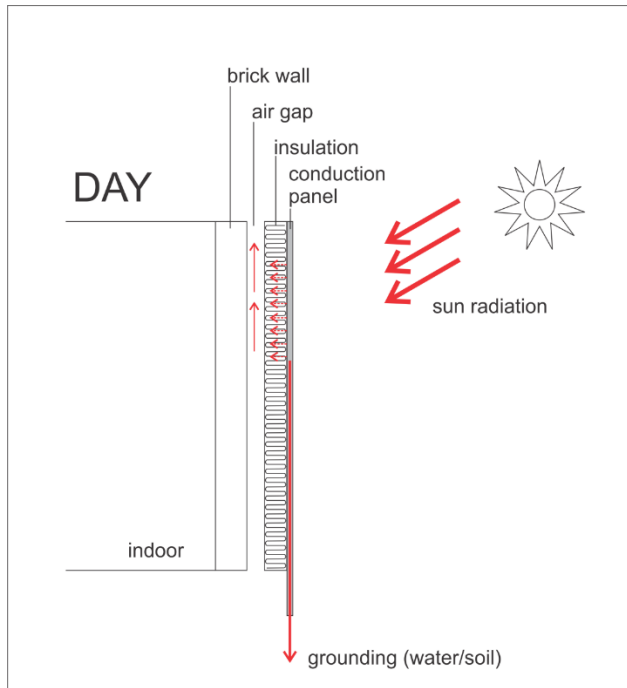
Teknologi konversi energi yang sangat bermanfaat saat ini adalah *photovoltaic* yang mengubah sinar matahari menjadi energi listrik (Gambar 20). Façade bangunan merupakan kolektor energi yang sangat menjanjikan.



Gambar 21 Dinding *Photovoltaic* dan *Photosynthesis* (dibuat dengan bantuan AI)

2.7 Façade Aktif

Konsep selubung aktif atau façade aktif (Gambar 22) merupakan konsep ideal karena didasarkan pada respons aktif / otomatis/ pintar yang sesuai dengan kebutuhan. Semula selubung aktif dikonsepsikan untuk mendapatkan kondisi ruang dalam yang stabil dan nyaman akibat fluktuasi kondisi ruang luar yang ekstrem. Pergerakan matahari harian yang paling banyak direspons oleh sirip-sirip pembayang yang mengikuti pergerakan matahari. Selain itu, teknologi kaca sudah memungkinkan mengubah kejernihannya sehingga dapat mengendalikan sinar matahari yang masuk melewati kaca / jendela.



Gambar 22 Prinsip kerja fasad aktif pada siang dan malam hari.

Selain respons pada matahari, respons pada pergerakan angin juga berpotensi untuk diterapkan untuk tujuan pendinginan kulit bangunan serta penurunan beban pendinginan ruang. Sirip-sirip penangkap angin digunakan untuk mengarahkan aliran udara ke permukaan bangunan untuk tujuan pendinginan. Efektivitasnya meningkat mekanisme tersebut bila melibatkan *evaporative cooling* serta pembayang aktif pada façade bangunan.

Konsep façade aktif ini sangat berpotensi juga untuk mengendalikan iklim mikro dan menurunkan intensitas UHI. Pengelolaan kalor pada kulit bangunan sangat penting dilakukan agar kalor pada kulit bangunan tidak terburukkan ke udara di sekitarnya. Façade aktif memungkinkan mekanismenya berbeda pada siang dan malam atau pada kondisi eksternal yang berbeda untuk mengendalikan pembauran energi termal ke udara.

Elaborasi teknologi façade dengan pendekatan konsep aktif dilakukan untuk menutupi kekurangan pendekatan pasif di mana satu rumusan digunakan untuk menjawab berbagai kondisi lingkungan. Konsep ini masih membutuhkan kajian lebih jauh untuk mencapai efektivitas yang baik.

3. PENYEJUKAN UDARA RUANG

3.1 Evaluasi Ruang Dalam

Tantangan penyejukan ruang dalam tidak kalah dengan ruang luar. Pada ruang luar, teknologi pengondisian lingkungan termal sedapat mungkin didasarkan pada pendekatan pasif. Pengondisian aktif untuk mengendalikan intensitas UHI sangat mahal dan jangkauannya tidak luas. Namun pengondisian termal gedung dan ruang secara aktif sudah sangat umum.

Penggunaan penyejuk ruang mekanik (AC) pada gedung-gedung di perkotaan menjadi sangat umum dan sulit dihindari. Teknologi penyejukan ruang dalam dengan cara memindahkan kalor ke ruang luar merupakan penyelesaian setempat dan sesaat yang sangat mahal (Gambar 23). Penerapan teknologi ini secara massal di lingkungan perkotaan menyebabkan pemanasan kawasan perkotaan sehingga lingkungan binaan masuk dalam lingkaran setan pemanasan.



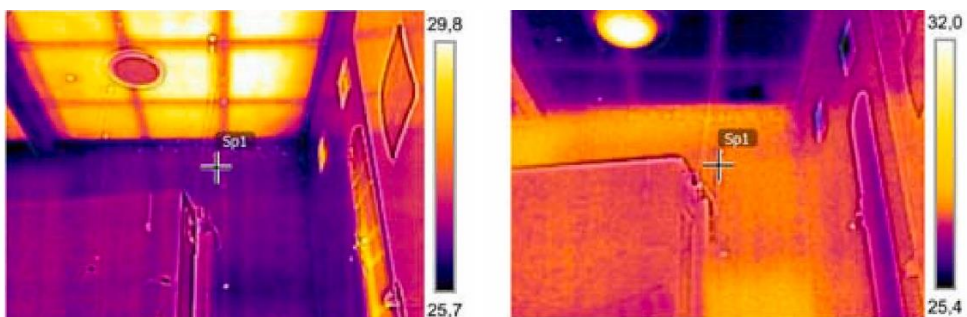
Gambar 23 Pemindahan kalor dari ruang dalam ke ruang luar (gambar dibuat dengan bantuan AI).

Berbeda dengan pengondisian lingkungan termal kawasan perkotaan, pada penyejukan ruang tidak hanya tergantung pada material *façade* tetapi juga pada pengguna ruang. Tingkat kebutuhan kenyamanan pengguna ruang berbeda-beda tergantung pada aktivitas dan kebutuhan penggunanya sangat menentukan tingkat kebutuhan penyejukan. Oleh karena itu pengembangan teknologi penyejuk udara ruang memiliki tantangan yang tidak kalah besar dibandingkan teknologi pengendalian lingkungan termal perkotaan.

Beban pendinginan atau *cooling load* pada ruang tidak hanya berasal dari pengguna ruang tetapi juga pelingkup ruang, yaitu dinding, lantai, langit-langit serta perabotan. Material pelingkup ruang bertukar kalor dengan udara ruang sehingga beban pendinginan ruang tergantung pada sifat termal materialnya (Tabel 1).

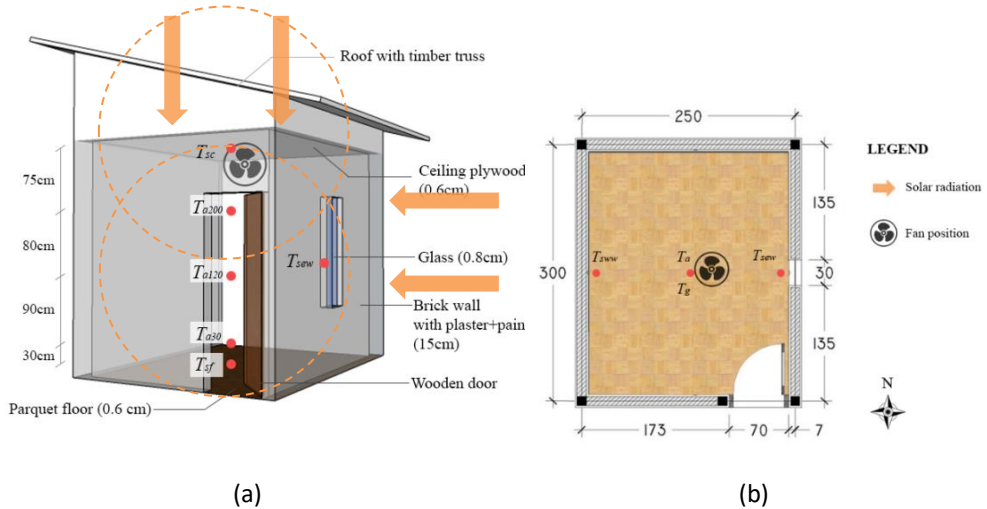
Beban pendinginan ruang juga tergantung pada bukaan termal ruang. Secara umum, arsitek dan masyarakat mengenal bukaan ruang, yaitu jendela sebagai bukaan pencahayaan, lubang angin sebagai bukaan ventilasi, pintu sebagai bukaan untuk manusia keluar dan masuk ruang. Bukaan termal adalah bukaan untuk keluar atau masuknya kalor dari ruang. Jendela kaca yang relatif tipis, selain berperan sebagai bukaan pencahayaan yang memungkinkan cahaya masuk atau keluar, berperan juga sebagai bukaan termal. Sinar matahari yang masuk ke dalam ruang menyebabkan pemanasan di dalam ruang. Sebaliknya pada malam hari, kehangatan ruang juga mengalir keluar melalui kaca jendela. Selubung kaca pada ruang berperan seperti baju tipis yang tidak dapat melindungi pengguna dari panas dan dinginnya udara. Sedangkan dinding bata berperan sebagai jaket tebal yang mampu melindungi pengguna dari kedinginan dan juga dari paparan sinar matahari langsung.

Pada rumah tinggal satu lantai (Gambar 24), langit-langit yang tidak diberi insulasi berperan sebagai bukaan termal. Pada siang hari, radiasi kalor masuk melalui langit-langit dan memanaskan ruang dalam. Pada Gambar 24 terlihat langit-langit multipleks bertemperatur lebih tinggi dari rangkanya. Langit-langit sebagai *heat source* untuk ruang tersebut pada siang hari, dan berperan sebagai bukaan pendingin pada malam hari.



Gambar 24 Langit-langit sebagai bukaan termal. Siang hari (kiri), malam (kanan) (Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., Tunçbilek E., Achسانی R.A., Arıcı M., Rahmah N., 2021)

Pada ruang tersebut dilakukan pengukuran udara ruang di lima ketinggian untuk memetakan temperatur udara serta dalam 4 posisi di dekat dinding timur-barat-utara-selatan dan satu di tengah ruang (Gambar 25). Pengukuran tersebut untuk melihat peran masa termal selubung dan bukaan-bukaan termal selama 24 jam.

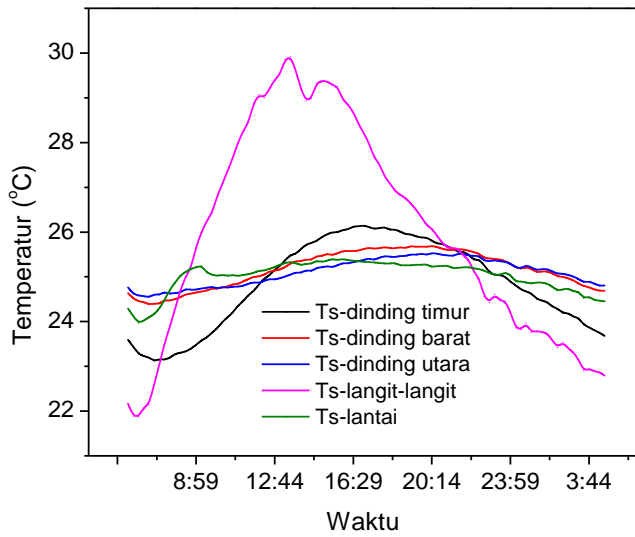


Gambar 25 Ruang dan pelingkup ruang (Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., Tunçbilek E., Achسانی R.A., Arıcı M., Rahmah N., 2021)

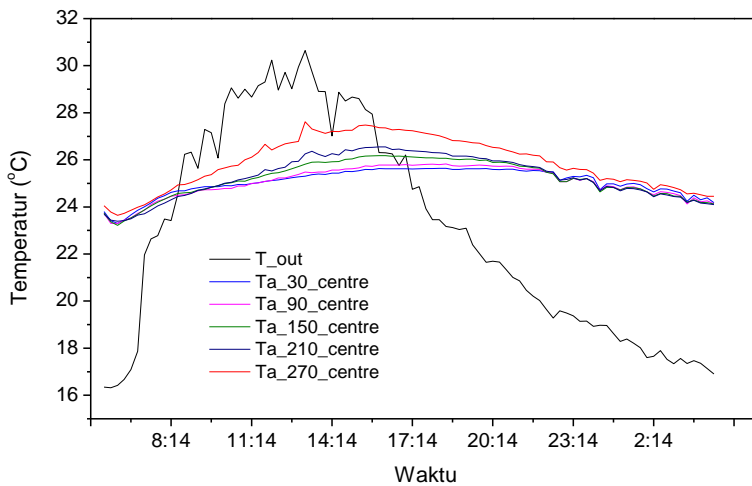
Temperatur langit-langit ruang berfluktuasi paling ekstrim mengikuti fluktuasi temperatur udara luar, sedangkan temperatur dinding dan lantai relatif stabil (Gambar 26).

Dinding bata dan lantai beton merupakan masa termal yang berperan besar memengaruhi temperatur udara ruang. Dinding timur yang menerima sinar matahari pada pagi hari, menyimpan kalor hingga subuh esok harinya. Pada Gambar 26 terlihat dinding timur bertemperatur lebih tinggi dari pelingkup lainnya pada malam hari.

Hasil pengukuran temperatur udara ruang menunjukkan perbedaan temperatur yang cukup besar di berbagai ketinggian (Gambar 27). Udara pada ketinggian 270 cm bertemperatur lebih tinggi dari udara di ketinggian 30 cm. Hal ini menunjukkan *buoyancy force* di mana udara bertemperatur tinggi naik dan udara bertemperatur rendah berada di bawah.



Gambar 26 Temperatur permukaan langit-langit paling berfluktuasi dibanding permukaan dinding dan lantai



Gambar 27 Variasi temperatur udara di berbagai ketinggian dan temperatur udara luar sebagai acuan.

Selain itu, temperatur udara di atas terpengaruh bukaan termal langit-langit dan udara di bawah terpengaruh masa termal lantai yang cenderung stabil sepanjang siang malam.

Upaya pengondisian udara ruang dalam perlu memperhatikan konfigurasi masa termal dan bukaan termal pelingkup ruang. Berbagai intervensi yang dapat dilakukan adalah:

1. Pengaturan bukaan termal.
2. Pengaturan masa termal
 - a. Pemberian masa termal internal.
 - b. Pengaturan *heat exchange* pada masa termal pelingkup ruang.

3.2 Pengaturan Bukaan Termal

Pengaturan bukaan termal langit-langit sangat direkomendasikan bagi ruang di bawah atap (Gambar 28). Atap rumah konvensional di Indonesia pada umumnya tidak mencukupi menghambat aliran kalor dari sinar matahari.



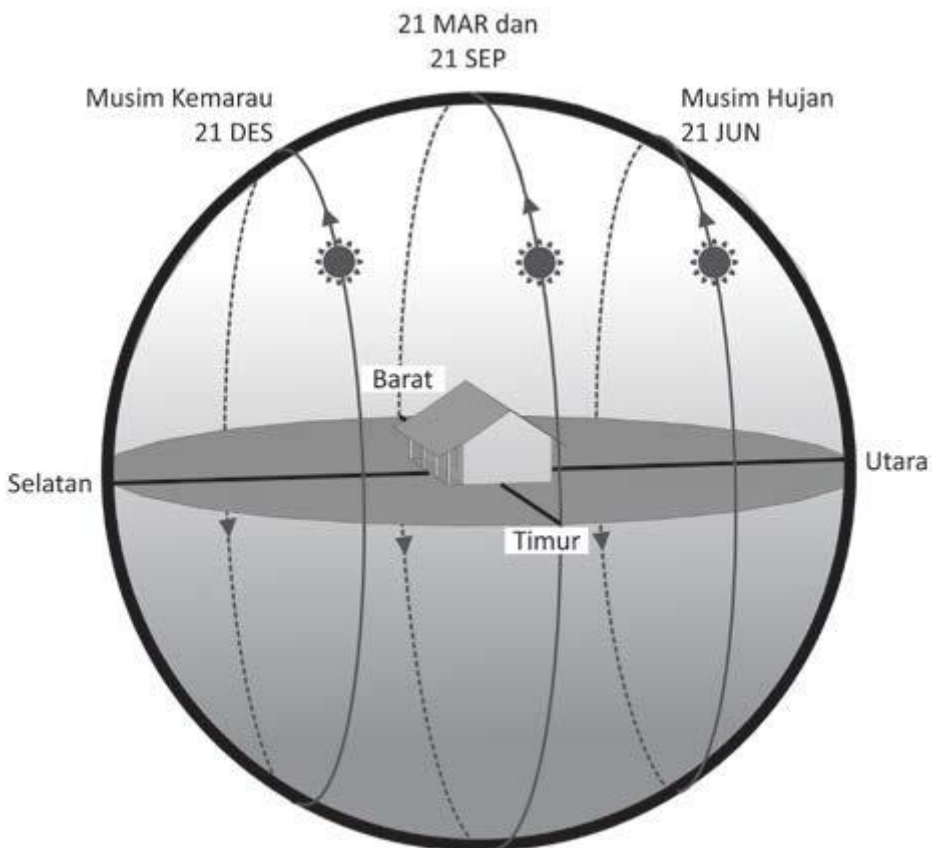
Gambar 28 Metoda semprot untuk aplikasi material insulasi termal. Sumber: <http://www.greenbuildingadvisor.com/blogs/dept/green-building-blog/procon-open-cell-or-closed-cell-foam>

Atap miring dengan penutup atap genting dan langit-langit multipleks 3 mm merupakan atap konvensional di perumahan di Indonesia. Ruang *attic* di bawah atap dilaporkan turut berperan mengurangi aliran kalor ke dalam ruang, demikian juga dengan pertukaran udara melalui celah-celah genting

mengeluarkan udara panas dari *attic*. Pada saat hujan, permukaan genting yang lembab membantu *evaporative cooling* pada permukaan genting dan ruang *attic*. Namun pada siang dan malam tanpa hujan, konfigurasi atap miring konvensional berperan sebagai bukaan termal yang merugikan.

Pengaturan bukaan termal yang umum dilakukan dalam praktik arsitektur adalah pada dinding dengan pengaturan orientasi jendela. Umumnya jendela tidak diletakkan pada sisi barat dan timur karena sinar matahari langsung masuk ke dalam ruang. Pengaturan sifat termal kaca yang menerima sinar matahari langsung menjadi penting untuk menghindari pemanasan ruang.

Namun pengaturan bukaan termal melalui atap jarang diperhatikan oleh para arsitek padahal posisi matahari di daerah tropis selalu di atas bangunan (Gambar 29). Penambahan insulasi termal pada atap di daerah tropis sangat penting untuk memperoleh kondisi ruang termal ruang lebih nyaman.



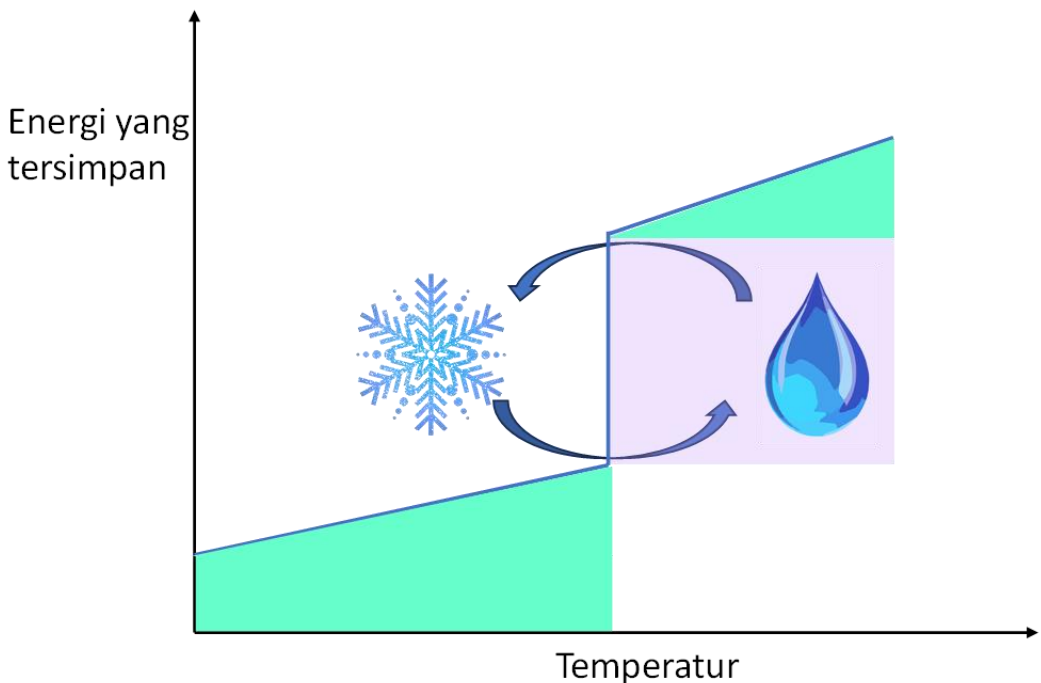
Gambar 29 Lintasan matahari di ekuator (Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., 2018).

Pengondisian termal ruang secara pasif merupakan aspek penting bagi arsitektur bangunan di Indonesia. Penerapan regulasi perizinan pembangunan memegang peran penting untuk mengendalikan konsumsi energi untuk penyejukan ruang.

Pada ruang uji ditambahkan intervensi masa termal internal untuk mengimbangi peran masa termal pelingkup ruang. Tambahkan masa termal internal berperan sebagai teknologi penyejuk udara pasif.

3.3 Pengaturan Masa Termal

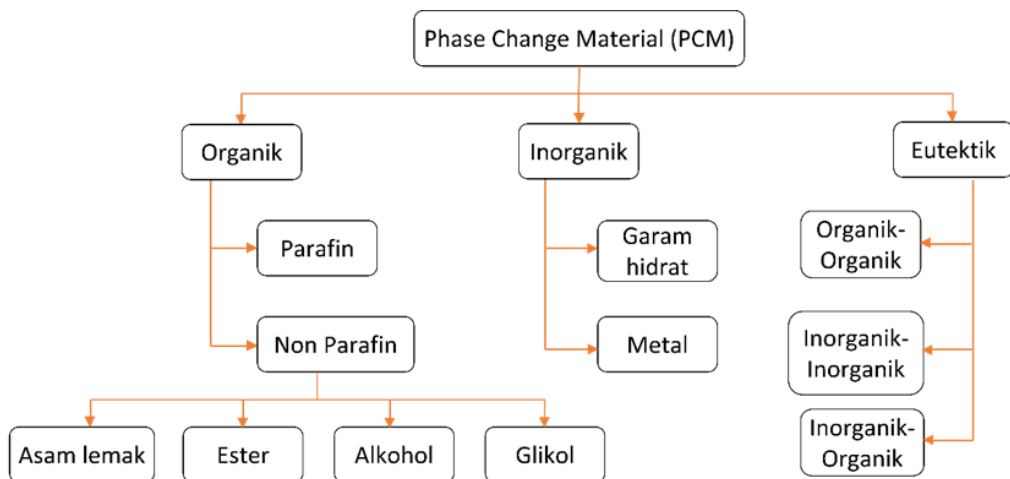
Upaya pengembangan teknologi penyejuk udara secara pasif tidak sederhana melibatkan teknologi pengumpulan kalor terburai di udara secara rendah energi. Teknologi penukar kalor menggunakan material berubah fasa atau *phase change material* (PCM) melibatkan proses *melting* dan *solidification* (Gambar 30). Pertukaran kalor pada proses *melting* dan solidifikasi sangat berbeda.



Gambar 30 Ilustrasi perubahan fasa material PCM pada proses serapan dan lepasan kalor. Adaptasi dari (Sadeghi, 2022)

Secara ideal model serapan kalor pada material PCM diilustrasikan sebagai proses serapan *sensible solid*, serapan *solid-liquid*, dan *sensible liquid*. Sedangkan proses pelepasan kalor diilustrasikan sebagai pelepasan *sensible liquid*, pelepasan *liquid-solid*, dan pelepasan *solid*. Terdapat fase laten *solid-liquid* dan *liquid-solid* dengan energi yang diserap dan dilepas digunakan untuk melepas atau merajut *chemical bonding* molekul dan tidak digunakan untuk perubahan temperatur.

Terdapat banyak PCM telah dikenal dan digunakan untuk berbagai tujuan terkait penyimpanan kalor, pendinginan, dan pemanasan (Gambar 31). Penggunaan PCM dalam aplikasi bangunan masih sangat terbatas, terkait dengan integrasinya pada sistem bangunan, usia pakai, kemasan hingga efektivitasnya.



Gambar 31 Klasifikasi PCM secara umum (Nishad S. dan Krupa I., 2022).

Salah satu pertimbangan utama pemilihan jenis PCM adalah pada temperatur perubahan fasenya. *Lauric acid* merupakan salah satu PCM organik dari minyak kelapa yang banyak dijumpai di Indonesia memiliki *melting point* 44 °C sedangkan minyak kelapa di 26 °C yang lebih sesuai sebagai penyerap kalor di daerah tropis. Selain itu garam hidrat $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ memiliki temperatur leleh di 29 °C yang berpotensi juga untuk aplikasi penyerap kalor di lingkungan tropis.

Berbagai kriteria dikembangkan untuk menentukan PCM yang tepat untuk aplikasi penyejukan udara ruang. Tabel 3 menunjukkan beberapa kriteria pemilihan PCM yang penting untuk menunjang aplikasinya sebagai

penyimpan energi termal laten. Minyak kelapa merupakan bahan organik yang secara ekonomi relatif murah dan mudah diperoleh di Indonesia, merupakan bahan menarik untuk diteliti aplikasinya. Konduktivitas termal minyak kelapa harus ditingkatkan agar efektivitas penggunaannya sebagai *thermal energy storage* (TES) dapat dioptimalkan.

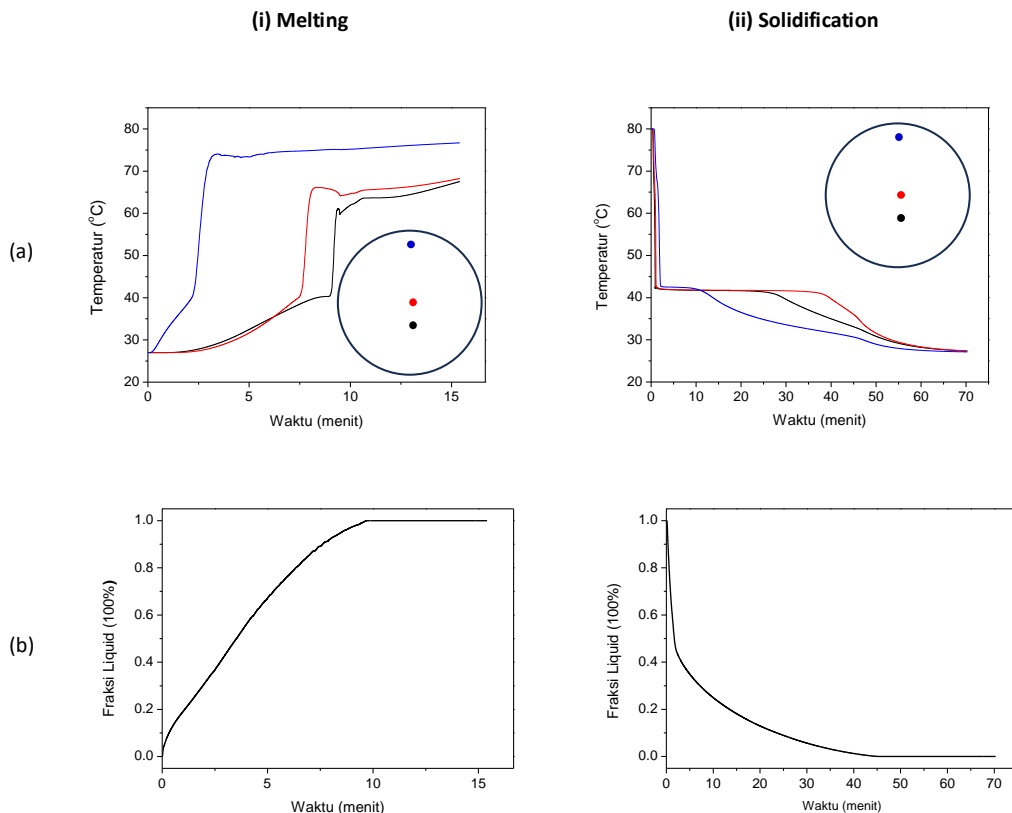
Tabel 3 Beberapa kriteria pemilihan PCM untuk penyimpan energi (Khan, Z., Khan, Z., dan Ghafoor, A., 2016) (Khan M.M.A., Saidur R., Al-Sulaiman F.A., 2017).

Termal	Fisik	Kimia	Kinetik	Ekonomi
Suhu transisi fase yang sesuai dengan aplikasinya	Tekanan uap rendah (<1 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

Model terapan memiliki kompleksitas yang jauh lebih banyak. Pengaplikasian material PCM sebagai *thermal energy storage* memang sangat menjanjikan karena PCM membutuhkan banyak energi untuk melepas dan merangkai *chemical bonding* pada fase laten. Namun proses *melting* dan *solidification* bukan suatu proses simetris seperti ilustrasi model ideal pada Gambar 32.

Pengamatan temperatur di beberapa titik dalam bola PCM lauric acid mengilustrasikan perubahan temperatur dalam proses *melting* dan solidifikasi. Dalam proses *melting*, perbedaan temperatur permukaan dan inti bola berbeda jauh, menunjukkan perpindahan kalor dibantu oleh proses konveksi. Sedangkan pada proses solidifikasi, perbedaan temperatur permukaan dan inti bola tidak jauh, menunjukkan bahwa perpindahan kalor didominasi oleh konduksi. Oleh karenanya, proses *melting* membutuhkan waktu yang jauh lebih singkat daripada solidifikasinya karena perpindahan kalor pada proses *melting* dibantu konveksi sedangkan pada proses solidifikasi hanya mengandalkan konduktivitas solid. Kondisi ini menyebabkan aplikasi PCM dengan mekanisme *charging* siang hari dan *discharging* malam hari tidak

dapat berlangsung sepenuhnya. Panjang malam kurang lama untuk proses solidifikasi penuh untuk sejumlah material yang dibutuhkan di siang harinya.



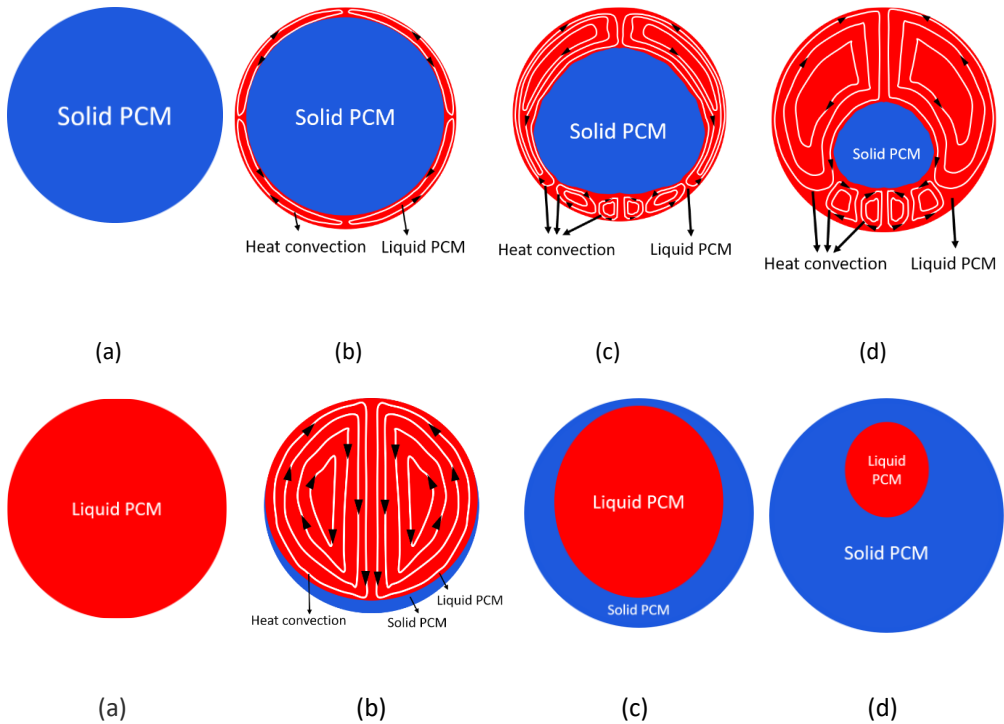
Gambar 32 Simulasi durasi melting lebih cepat dari *solidification* (a) *monitoring* temperatur di beberapa titik, (b) fraksi liquid dan solid dan durasi waktu yang dibutuhkan.

Perbaikan pada nilai konduktivitas termal PCM membantu proses solidifikasi terjadi lebih cepat agar PCM dapat digunakan sesuai durasi siang dan malam.

Aplikasi PCM lauric acid dengan *melting point* 44 °C pada pendinginan bangunan masih membutuhkan rekayasa disain yang tidak sederhana. Salah satu potensi penggunaan PCM lauric acid adalah untuk pendinginan selubung bangunan dengan temperatur dinding dapat mencapai 70 °C bila terpapar sinar matahari langsung. Sedangkan, aplikasi langsung pada penyejuk udara membutuhkan PCM dengan *melting point* lebih rendah.

Proses pencairan dan pembekuan secara fisika dapat diilustrasikan pada tampilan fraksi solid atau liquid (Gambar 33). Proses solidifikasi dimulai dari

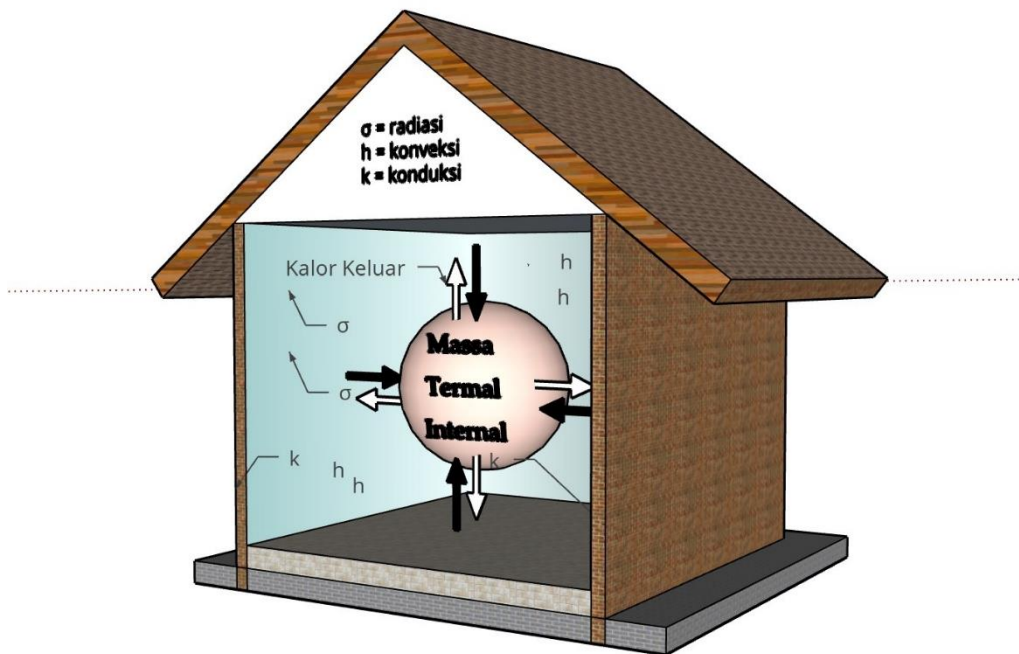
sisi luar, sehingga rambatan kalor didominasi oleh konduksi. Berbeda dengan proses pencairan yang rambatan kalor didominasi oleh konveksi sehingga prosesnya berlangsung jauh lebih cepat.



Gambar 33 Ilustrasi proses *melting* (serapan kalor) dan solidifikasi (lepasan kalor) pada PCM berbentuk bola.

Karakteristik perubahan fase ini menentukan teknologi penukar kalor agar proses penyimpanan dan pelepasan kalor berlangsung efektif. Secara ideal pencairan terjadi siang hari dan pembekuan terjadi saat malam. Pada siang hari terjadi penyerapan kalor dari lingkungan ke TES dan sebaliknya terjadi pelepasan kalor ke lingkungan dari TES pada malam hari. Dikarenakan pencairan dan pembekuan membutuhkan waktu yang berbeda maka proses pembekuan berlangsung tidak sempurna. Dibutuhkan intervensi agar proses pembekuan dapat berlangsung lebih cepat dan efektif, salah satunya dengan memperbaiki konduktivitas termalnya dengan doping nano partikel.

PCM sebagai TES dan *heat exchanger* di dalam ruang, berperan sebagai masa termal internal untuk mengimbangi masa termal ruang, yaitu dinding bata dan lantai beton (Gambar 34).



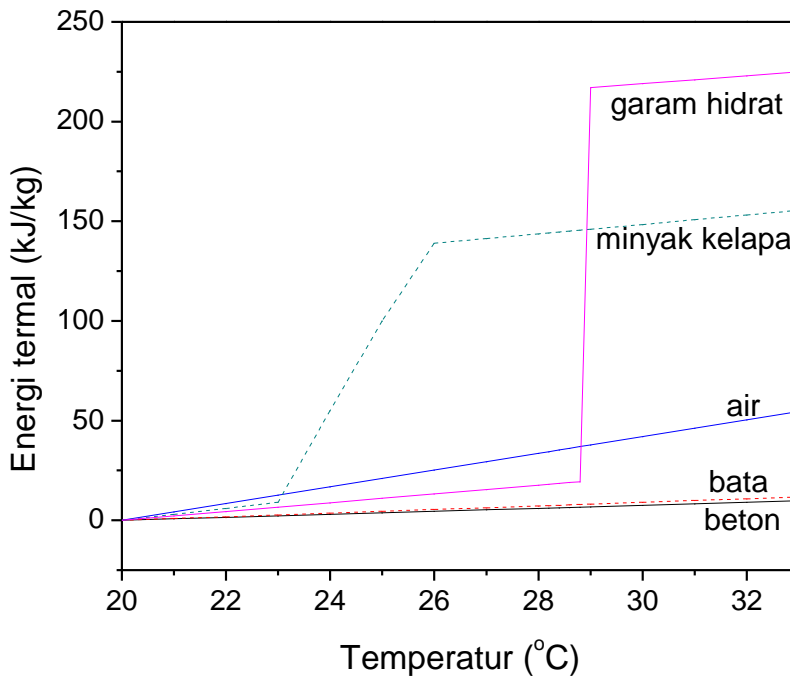
Gambar 34 Ilustrasi peran Internal Thermal Mass untuk penyejukan udara ruang

Sebagai salah satu PCM organik, minyak kelapa memiliki kapasitas kalor yang besar jauh di atas air, beton dan bata, sehingga PCM minyak kelapa berpotensi sebagai masa termal internal yang mampu memengaruhi temperatur udara ruang. Fase laten *solid-liquid* berperan banyak dalam penyerapan dan pelepasan kalor (Gambar 35).

Jumlah kalor yang tersimpan pada PCM sebagai sistem penyimpanan energi termal laten diformulasikan menurut persamaan (Lane, G. A., dan Shamsundar, N., 1983):

$$Q = m[c_s(T_m - T_i) + a_m h_f + c_l(T_f - T_m)] \quad (3.1)$$

dengan m adalah massa dari PCM dengan temperatur *melting* T_m ; c_s adalah kalor jenis fase solid; c_l adalah kalor jenis fase cair; a_m adalah fraksi leleh; h_f adalah enthalpy fusi, T_i dan T_f adalah temperatur awal dan akhir.



Gambar 35 Perbandingan kinerja penyimpanan kalor PCM minyak kelapa terhadap beton, bata, dan air pada rentang temperatur 20-32 °C.

Penyejuk udara ruang dimungkinkan dengan meletakkan sebuah penukar kalor pasif pada ruang tersebut. Panil penukar kalor ini dialiri udara dalam proses penukaran kalor. Kompleksitas pemanfaatan PCM sebagai penukar kalor bergantung pada kondisi lingkungan yaitu profil temperatur harian dan bulanan serta intensitasnya.

Minyak kelapa merupakan bahan organik dengan bermacam kandungannya memiliki profil fase latent yang lebar atau titik lelehnya dalam rentang temperatur 23- 26 °C. Kondisi ini menguntungkan karena minyak kelapa dapat bekerja dalam rentang temperatur yang dibutuhkan untuk mencapai kenyamanan pengguna ruang.

Efektivitas penggunaan minyak kelapa sebagai penyejuk udara di lingkungan tropis dapat dilihat dengan mencoba mengaplikasikan secara langsung penggunaan material tersebut. Sebagai pembanding kinerja minyak kelapa digunakan pembanding air sebagai TES. Eksperimen langsung dalam kondisi nyata dapat menunjukkan kinerja PCM minyak kelapa dan air dalam

profil temperatur udara harian siang dan malam yang unik sehingga kinerja penukar kalor lebih mudah dipelajari (Gambar 36).



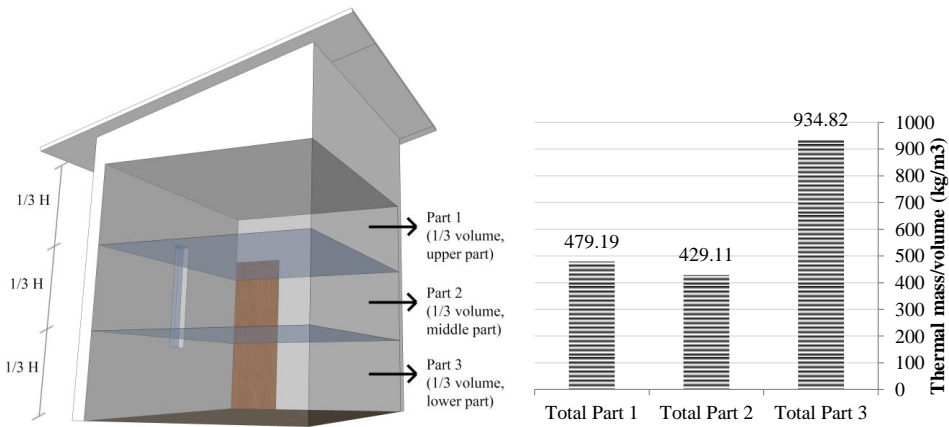
Gambar 36 Model Masa Termal Internal berisi PCM

Pengukuran efek penukar kalor dilakukan pada berbagai ketinggian di ruang uji untuk melihat distribusi temperatur vertikal dan horizontal. Secara vertikal ruang dibagi menjadi tiga zona, atas, tengah dan bawah. Zona atas di bawah langit-langit bertemperatur paling tinggi pada siang hari karena radiasi matahari masuk melalui atap dan memanaskan lapisan langit-langit (Gambar 37). Selain itu udara yang bertemperatur lebih tinggi naik ke zona atas. Zona bawah bertemperatur paling rendah dan zona tengah bertemperatur di antaranya.

Penerapan penukar kalor pada ruang tersebut memengaruhi distribusi temperatur vertikal ruang siang dan malam. Penerapan masa termal internal PCM di tengah ruang menurunkan temperatur udara ruang terutama di zona

atas dan tengah pada siang hari. PCM minyak kelapa lebih efektif daripada masa termal air (Gambar 38).

Pada malam hari, penerapan masa termal internal memanaskan udara ruang baik di zona atas, bawah, dan tengah.

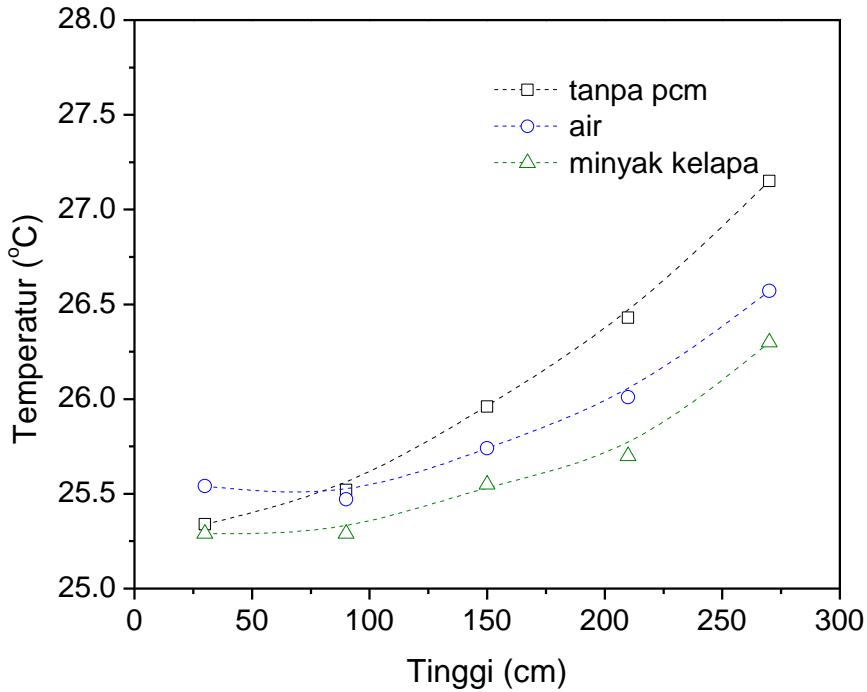


Gambar 37 Komposisi masa termal pada ruang uji

Distribusi vertikal temperatur udara pada siang dan malam hari dapat diperbaiki dengan mengatur posisi masa termal internal. Masa termal internal setinggi lemari 2 m cukup efektif memengaruhi temperatur udara di bawah langit-langit. Masa termal internal setinggi meja efektif menyejukkan zona ruang kerja pada ketinggian manusia (Gambar 36).

Penggunaan minyak kelapa sebagai penyejuk udara lebih efektif daripada air. Penggunaan minyak kelapa tersebut berperan sebagai masa termal internal. Berbagai perabot di dalam ruang berperan juga sebagai masa termal yang ikut mengendalikan temperatur udara ruang. Integrasi material perabot ruang dengan PCM dapat memberikan kondisi termal ruang yang lebih baik.

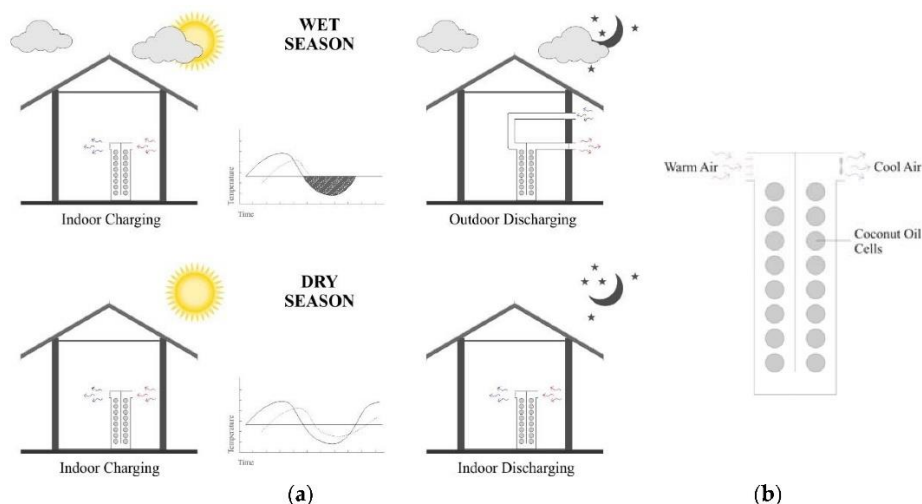
Proses penyejukan udara melalui proses penyerapan kalor oleh PCM umumnya dapat berlangsung lebih mudah dan efektif. Namun proses pelepasan kalor malam hari berpotensi menimbulkan pemanasan ruang serta proses solidifikasi yang tidak sempurna. Temperatur udara malam ruang yang tidak cukup dingin menyebabkan proses pelepasan kalor dari PCM tidak berlangsung optimal dan pada gilirannya mengurangi efektivitas penyerapan kalor besok paginya.



Gambar 38 Distribusi temperatur udara vertikal: (a) siang hari, (b) malam hari.

Pelepasan kalor malam hari di dalam ruang, menyebabkan temperatur udara malam hari tidak nyaman dan jauh dari temperatur yang dibutuhkan pada musim tertentu. Pada kajian ini, rentang temperatur udara pada musim hujan tidak terlalu lebar. Siang tidak terlalu panas dan malam tidak terlalu dingin. Sebagai akibat temperatur udara malam yang cukup hangat maka pelepasan kalor malam hari di dalam ruang kurang efektif. Pada kondisi ini pelepasan kalor PCM lebih efektif dilakukan di luar ruang. Namun di musim kemarau pada bulan Juli-Agustus, temperatur udara malam hari cukup dingin sehingga pelepasan kalor di dalam ruang membantu menghangatkan ruang. Untuk meningkatkan efektivitas penyejukan siang hari, proses pelepasan kalor malam hari dilakukan di luar ruang (Gambar 39).

Sebagai rangkuman, refleksi terhadap kinerja rumah tinggal di Indonesia, kondisi lingkungan termal ruang dalam adalah sebagai fungsi dari insulasi termal atap, serapan dan penyimpanan kalor dari sinar matahari, penundaan rambatan kalor oleh dinding selubung serta serapan dan lepasan kalor masa termal internal.

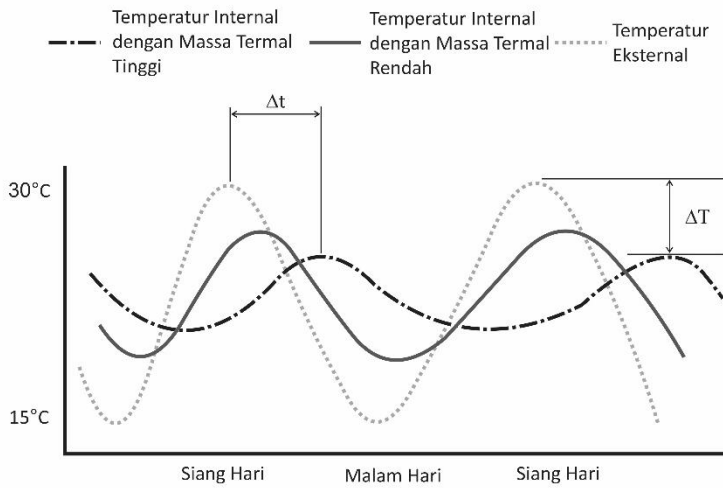


Gambar 39 (a) Ilustrasi penyerapan *heat exchanger* PCM pada siang hari dan malam and (b) Ilustrasi pertukaran kalor. (Wonorahardjo, S.; Sutjahja, I.M.; Kurnia, D.; Fahmi, Z.; Putri, W.A., 2018)

Secara khusus peran atap menunjukkan profil temperatur udara ruang yang kurang baik karena terpengaruh oleh kondisi insulasi atap yang kurang. Temperatur udara berfluktuasi mengikuti temperatur udara luar sehingga kurang nyaman. Temperatur ruang menjadi terlalu tinggi pada siang hari dan dingin pada malam hari, terutama pada zona atas (di bawah langit-langit). Perbaikan kondisi termal ruang dapat dilakukan dengan menambah insulasi termal pada bagian atap. Ruang *attic* kurang mampu menghambat rambatan kalor masuk dan keluar melalui lapisan langit-langit.

Secara khusus peran dinding ruang juga merupakan masa termal selubung (ETM). Masa termal ini membantu menunda rambatan kalor masuk ke dalam ruang. Semakin tebal dinding selubung semakin lama penundaan kalor yang masuk. Karena efeknya penundaan tersebut, dinding tebal disukai masyarakat karena ruang terasa lebih sejuk, walaupun pada malam hari menjadi lebih hangat (Gambar 40).

Penambahan masa termal dinding dengan cara mencampur bata dengan PCM mampu menunda kenaikan temperatur udara cukup lama dan menurunkan intensitasnya. Walaupun efek ini terlihat menguntungkan, tetapi dinding bata ini berefek buruk karena ikut menaikkan intensitas UHI. Dengan demikian ide untuk menaikkan masa termal dinding bukan strategi yang tepat, sehingga meningkatkan masa termal internal lebih tepat untuk lingkungan tropis (Gambar 41).



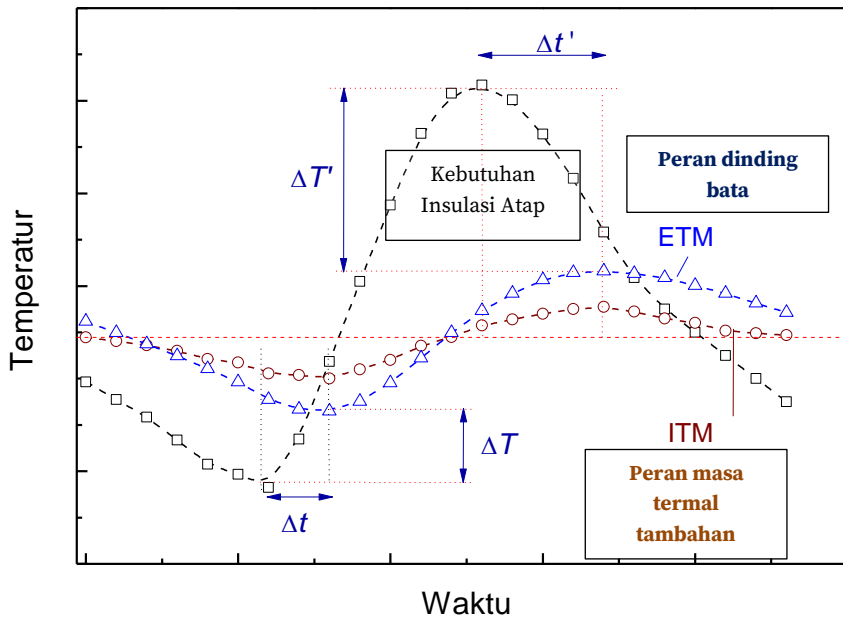
Gambar 40 Ilustrasi pengaruh massa termal pada temperatur udara ruang (Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., 2018)

Selubung bangunan menempati posisi strategis karena dapat memengaruhi ruang dalam maupun ruang luar. Oleh karena itu, kajian selubung pintar sangat dibutuhkan agar dapat mengondisikan udara ruang tanpa memberikan efek pemanasan ruang luar.

Selubung bangunan, pembentuk batas antara ruang luar dan dalam, semula dirumuskan sebagai batas pelindung dari hujan dan panas. Selubung ruang menjanjikan ruang dalam yang nyaman dan aman. Saat ini, konsep selubung ruang / selubung bangunan harus dirumuskan kembali. Ruang yang dikelola bukan hanya ruang dalam tetapi termasuk ruang luar.

Selubung bangunan mendapat beberapa fungsi baru, yaitu sebagai pengelola kalor yang diperoleh dari paparan sinar matahari, fitur mitigasi pemanasan lingkungan hingga penghasil energi baru.

Pengembangan teknologi pengendalian lingkungan termal bangunan dan kawasan perkotaan masih merupakan tantangan besar bagi kita semua, oleh karenanya dibutuhkan berbagai kajian lebih lanjut dan kerja sama yang sangat erat di antar-berbagai bidang keilmuan terkait.



Gambar 41 Hubungan pelingkup ruang dan profil temperatur udaranya

4 VISI KOLABORASI

Teknologi pengendalian lingkungan termal dapat diaplikasikan untuk ruang tinggal di dalam gedung maupun secara luas di ruang-ruang kota. Teknologi pengendalian lingkungan termal ini berperan sebagai penyejuk udara yang berpotensi menghemat penggunaan energi yang semula digunakan untuk *air conditioner* atau AC.

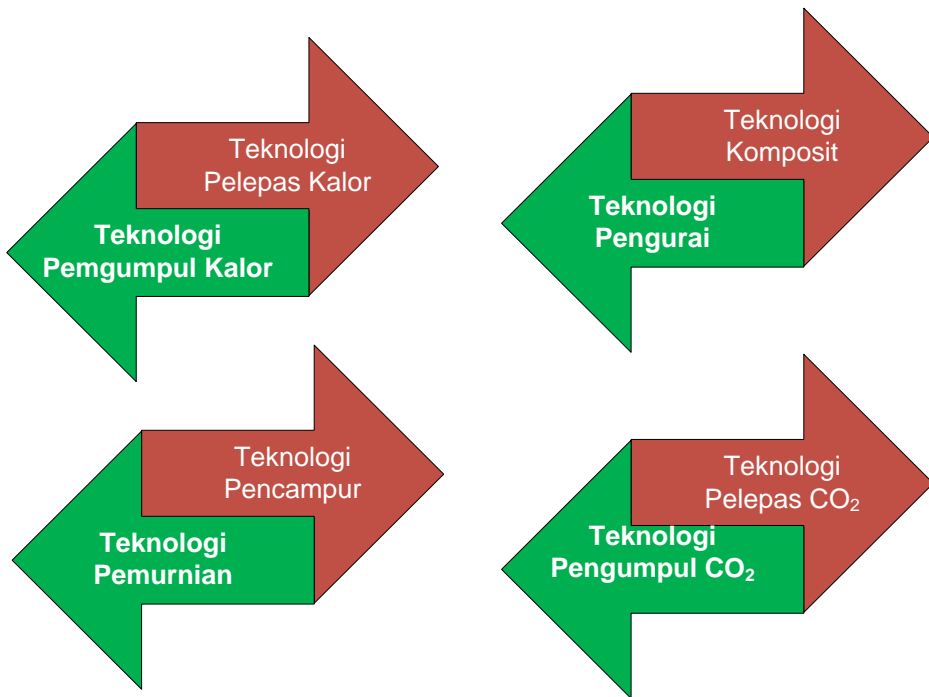
Pendekatan desain pasif pada sistem penukar kalor untuk penyejuk udara berbasis PCM sangat tergantung pada efektivitas pertukaran kalornya. Hal ini membutuhkan kajian *thermophysics* yang mendalam tentang proses pencairan dan pembekuan PCM serta intervensi pada nilai konduktivitas termal untuk memperlancar proses serapan dan lepasan kalornya. Beberapa upaya yang telah dilakukan adalah menggunakan nano partikel non-magnetik dan magnetik yang dapat diarahkan menggunakan medan magnet statis. Stabilisasi dopant magnetik tersebut membutuhkan material lain (*surfactant*) untuk stabilisasi suspensi sehingga keberhasilan transport kalor, penyimpanan dan pelepasan membutuhkan kajian kolaborasi lebih lanjut dengan keilmuan kimia-fisik.

Kajian kimia-fisik menjanjikan profil material yang ideal sebagai penukar kalor di masa mendatang. Intervensi sifat-sifat material untuk mendapatkan material dengan laju konduktivitas kalor yang dapat diatur untuk menyesuaikan dengan kebutuhan penyejukan.

Kajian material penyimpan energi termal sama pentingnya dengan kajian material untuk baterai yang kita gunakan untuk telepon genggam, UPS, motor dan mobil listrik.

Perlombaan inovasi material untuk media penyimpan energi akan menjadi beban bagi lingkungan. Kajian keberlanjutan harus selalu menjadi satu bagian pada inovasi material. Kimia analitik, teknik-teknik separasi untuk memisahkan berbagai bahan yang telah dicampurkan merupakan area studi yang sangat dibutuhkan saat ini dan masa mendatang.

Pengelolaan limbah kalor di lingkungan membutuhkan inovasi material penyimpan kalor yang berpotensi menimbulkan masalah sampah material baru. Inovasi teknologi selalu dibutuhkan untuk mendapatkan kesetimbangan baru pada lingkungan (Gambar 42).



Gambar 42 Konsep Teknologi Berkelanjutan. (Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., 2018)

Sebagai penyeimbang, inovasi teknologi dengan arah yang berlawanan dibutuhkan (Gambar 42). Kalor yang terbuarkan di atmosfer tidak dapat lepas ke angkasa karena selimut gas rumah kaca. Sumber energi yang kita terima dari matahari setiap hari dapat menjadi bumerang bagi lingkungan binaan. Teknologi penangkapan kalor untuk menurunkan intensitas pemanasan merupakan teknologi mitigasi paling tepat saat ini. Sebagai pelengkap, teknologi penangkap CO₂ (*Carbon Capture & Storage*) menurunkan efek gas rumah kaca, bila dilaksanakan secara konsisten, kedua teknologi tersebut bekerjasama menurunkan temperatur udara secara lebih efektif.

Pengembangan teknologi pengumpul kalor dapat diikuti dengan teknologi pembumian, konversi dan utilisasi. Teknologi pembumian terhadap energi kalor yang terbuarkan cukup sederhana, dengan bantuan fluida dan sedikit energi untuk transpor kalor. Pembumian dengan cara pasif membutuhkan material dengan konduktivitas termal yang sangat baik. Laju perpindahan kalor pasif relatif lambat dibandingkan aliran fluida. Pengembangan teknologi ini membutuhkan kolaborasi dengan bidang teknologi material. Material pengalir kalor sangat dibutuhkan untuk pengelolaan kalor pada selubung bangunan agar tidak terbuarkan ke udara.

Teknologi pengumpul kalor, pengumpul CO₂, pemurni dan pengurai, merupakan teknologi penyeimbang lingkungan binaan. Teknologi penyeimbang sudah sangat mendesak saat ini, karena kerusakan lingkungan sudah menjadi kenyataan sehari-hari yang kita sadari. Dengan demikian dapat dipahami, syarat utama keberlanjutan lingkungan binaan adalah terjaminnya kesetimbangan daya dukung lingkungan.

Kesadaran ini, mendorong kita semua untuk bergandeng tangan, berkolaborasi dengan baik, merangkai pengetahuan dari berbagai area studi terkait untuk menjamin keberlanjutan lingkungan binaan kita bersama.

5 UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur dipanjatkan kepada Tuhan Allah Yang Maha Pengasih dan Penyayang atas rahmat yang telah diberikan untuk memperoleh amanah Guru Besar Institut Teknologi Bandung di bidang Lingkungan Termal Bangunan. Semoga amanah besar ini dapat dijalankan dengan baik dan penuh tanggung jawab, amin.

Saya persembahkan pencapaian ini untuk kedua orang tua saya, ayahanda Drs. Budi Sarwono Wonorahardjo (alm) dan ibunda Ratnatiningsih Nataatmadja (alm) yang telah memberikan hidup mereka untuk kami anak-anaknya dan menjadi teladan sebagai pendidik dan guru sejati yang tertanam dalam diri kami sampai saat ini. Filosofi hidup bersahaja sebagai pendidik yang mewarnai hari-hari bertumbuhnya kami menjadi pribadi mandiri senantiasa kami ingat di setiap langkah yang kami ambil.

Pencapaian ini tidak mungkin tercapai tanpa dukungan dan kasih sayang istri tercinta, Profesor Inge Magdalena Sutjahja S.Si., M.Si., Ph.D., serta ketiga anak kami tercinta Sannia Josephine, Sandia Jonathan, Sanferis Johanesa yang setia mendampingi belajar dan berkarya siang dan malam.

Perjalanan hidup kami dari lahir bersama semua saudara kandung saya, kakak saya Dr. Surjanto Wonorahardjo, SpS dan Ny. Augusta Amalia, dan Prof. Dra. Surjani Wonorahardjo, Ph.D., beserta suami Mikhael Mison, S.S., beserta putri mereka: Emanuella Angelina Wonorahardjo Mison, adik bungsu saya Ir. Surjandari Wonorahardjo dan suaminya Teguh Hermawan beserta ketiga putra putri mereka: Kanaya, Marino, dan Loreta.

Demikian pula kepada Tante Dr. Gita Andrajani Nataatmaja, S.U., beserta semua paman dan bibi keluarga Wonorahardjo yang mewarnai hari-hari kami di masa lalu. Terima kasih juga sebesar-besarnya kepada ayah mertua Bpk. Harry Subur Sutjahja. (alm) dan Ibunda Hilda Handajani (alm) atas bimbingan dan doa restu untuk perjalanan hidup kami. Terima kasih kepada Tante S.E. Happy Banjuradja dan Tante Janne Mulyani yang hadir di sini menggantikan orang tua kami beserta segenap keluarga besar dari Sampit dan Banjarmasin. Terima kasih kepada, Bapak Ir. L. Budi Triadi, Dipl. HE., IPU-SDA, ACPE, ASEAN Eng., sebagai wakil keluarga ayah kami. Terima kasih pula kepada Om Eddy Umbas dan Tante Lany, Tante Liesye, kakak ipar Ibu Cinthya Christiana S., S.E. dan Bpk. Sukardi, S.Kom. sebagai wakil keluarga Sutjahja, kami

merasakan doa dan restu segenap keluarga menyertai langkah-langkah kami sekeluarga di Bandung.

Secara khusus, kami haturkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Bapak Dr. Ir. Aswito Asmaningprodjo, MSA beserta Ibu yang telah membimbing kami memasuki dunia akademis dan profesional sebagai arsitek pada awal kami beranjak mandiri. Tidak kurang rasa terima kasih kami pada guru-guru kami di Arsitektur ITB, khususnya Bapak Prof. Ir. Iwan Sudradjat MSA Ph.D, Prof Dr. Ir. Sugeng Triyadi M.T., Bapak Ir. Boediono Soerasno MSc. BEM (alm). Bapak Dr. Ir. Sugeng Rahardjo (Alm). Juga guru-guru kami di Arsitektur Brawijaya Malang, khususnya Bapak Ir. Jusuf Tojib MSA.

Terima kasih yang sebesar-besarnya pada Pimpinan ITB dan Dekanat SAPPK, yang mengawal pengurusan guru besar saya; Bapak Prof. Dr. Ing. Ir. Widjaja Martokusumo, Bapak Dr. Ir. Denny Zulkaidi, MUP., Ibu Prof. Dr. Sri Maryati, S.T., MIP. Serta pimpinan senat SAPPK ITB Bapak Prof. Ir. Haryo Winarso, M.Eng., Ph.D., Bapak Dr. Ir. Agustinus Adib Abadi, M.Sc..

Terima kasih juga pada para Kaprodi Arsitektur, para ketua KK di lingkungan SAPPK, khususnya kepada Bapak Prof. Dr. Ir. Sugeng Triyadi M.T, serta seluruh anggota KK Teknologi Bangunan.

Terima kasih kepada para Guru Besar yang telah berkenan memberikan rekomendasi dan penilaian: Bapak Prof. Asep Gana Suganda (Alm), Bapak Prof. Ir Iwan Sudradjat MSA Ph.D, Ibu Prof. Dr. Ing. Ir. Himasari Hanan, M.A.E., Ibu Prof. Ir. Puji Lestari, Ph.D., Bapak Prof. Ir. Ketut Wikantika, M.Eng., Ph.D., Bapak Prof. Dr. Ir. Sugeng Triyadi M,T., Bapak Prof. Dr. Ing. Ir. Widjaja Martokusumo, Bapak Prof. Drs.Arief Rosyidie, MSP, M.Arch., Ph.D., dan Bapak Prof. Dr. SR. Abdul Ghani Khalid.

Terima kasih juga kepada para Senior Guru Besar di SAPPK, dosen Arsitektur dan PWK yang tidak mungkin saya sebutkan satu per satu.

Terima kasih kepada rekan-rekan kolaborasi dari Teknik Material FTMD ITB, Ibu Dr.rer.nat. Mardiyati, S.Si., M.T., Dr. Steven, S.T., M.T. Terima kasih pula untuk para mahasiswa bimbingan yang turut berperan aktif dalam pemenuhan karya ilmiah untuk mencapai jabatan guru besar: khususnya pada Rizky Amalia Achsani S.T., M.T., Suwardi Tedja S.T., M.T., Wulani Enggar Sari S.T. M.T., Dr. Nancy Yusnita (UNPAR), Siti Aisyah Damiati, Ph.D. (University of Adelaide). Rizki Fitria Madina S.T., M.T. (Universitas Trisakti),

Kurniati Ornam S.T., M.T. (Universitas Halu Oleo), Prameswara S.Si. (Fi-ITB), Dixon Thomas S.Si. (Fi-ITB), Akhmad Yusuf S.Si., M.Si. (Fi-ITB), dan Heri Andoni S.T., M. Ars..

Terima kasih juga rekan-rekan Dempo 1987 SMAK St. Albertus Malang dan kepada rekan-rekan Arsitektur Universitas Brawijaya Malang yang menjadi teman tumbuh bersama.

Terima kasih pada para kolaborator penelitian internasional: Bapak Prof. Sheikh Ahmad Zaki (Universiti Teknologi Malaysia), Bapak Prof. Müslüm Arıcı (Kocaeli University), Ekrem Tunçbilek (Kocaeli University) dan pihak lain yang tidak mungkin disebutkan satu persatu

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 juga bersyukur ke hadirat Tuhan yang Maha Kasih yang memberi semuanya termasuk waktu dan kesempatan kami untuk hidup dan berkarya. Demikian saya sampaikan, dengan segala kerendahan hati semoga bermanfaat bagi kita semua.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbari H., Pomerantz M., and Taha H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar energy*, 70(3), 295-310. doi:[https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Asdrubali F., Alessandro F. D., Schiavoni S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1–17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
- Bennett, D. (2010). *Sustainable Concrete Architecture*. London : RIBA Publishing.
- Chaykovskiy, G. (2010). Comparison of Thermal Insulation Materials for Building Envelopes of the Multi-storey Buildings in Saint-Petersburg, Bachelor Thesis. Retrieved from https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/24695/Chaykovskiy_German.pdf;jsessionid=552225E031AD5CDA2ED05E27470F34EA?sequence=1.
- Davis J.R. (editor). (1999). *Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys*, vol. 4.
- Howard, L. (1818). *The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations Made at Different Places in the Neighbourhood of the Metropolis*. Volume 1.
- Howard, L. (1820). *The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations Made at Different Places in the Neighbourhood of the Metropolis*. Volume 2.
- <http://qbond.co/images/SpecsPE.pdf>. (n.d.).
- <https://www.koppglass.com/blog/glass-thermal-properties-and-their-role-product-design>. (2015).
- Khan M.M.A., Saidur R., Al-Sulaiman F.A. (2017). A review for phase change materials (PCMs) in solar absorption refrigeration systems. *Renew Sustain Energy Rev*, 76, 105–37. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.070>
- Khan, Z., Khan, Z., dan 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. doi:<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.045>

- Kreith, F., Manglik, R.M., Bohn, M.S. . (2011). *Principles of Heat Transfer, 7th ed.* Cengage Learning, Inc.
- Lane, G. A., dan Shamsundar, N. (1983). Solar Heat Storage: Latent Heat Materials, Vol. I: Background and Scientific Principles. *Journal of Solar Energy Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1115/1.3266412>
- Lewis, R.W., Morgan, K., Thomas, H.R., Seetharamu, K.N. (2013). *The Finite Element Method in Heat Transfer Analysis*. India: Wiley.
- Nam J., Ryou H.-S., Kim D.-J., Kim S.-W., Nam J.-S., Cho S. (2015). Experimental and numerical studies on the failure of curtain wall double glazed for radiation effect. *Fire Sci. Eng.*, 29(6), 40–44. doi:<https://doi.org/10.7731/KIFSE.2015.29.6.040>
- Nieuwenhuys, E. (2006). *Thermal insulation materials made of rigid polyurethane foam (PUR/PIR): Properties – Manufacture*. Retrieved from https://highperformanceinsulation.eu/wp-content/uploads/2016/08/Thermal_insulation_materials_made_of_rigid_polyurethane_foam.pdf.
- Nishad S. dan Krupa I. (2022). Phase Change Materials for Thermal Energy Storage Applications in Greenhouses: A Review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, Part C, 102241.
- Oke, T. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24.
- Ornam K., Wonorahardjo S., Triyadi S. (2024). Several façade types for mitigating urban heat island intensity. *Building and Environment*, 248, 111031. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111031>
- Sadeghi, G. (2022). Energy storage on demand: Thermal energy storage development, materials, design, and integration challenges. *Energy Storage Mater.* , 46, 192–222. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.01.017>
- Statista. (2023). <https://www.statista.com/topics/11787/the-construction-materials-industry-worldwide/#topicOverview>.
- Storm, S. (2004). *Density of glass*, in: *The Physics Factbook: an Encyclopedia of Scientific Essays*. Retrieved from <https://hypertextbook.com/facts/2004/ShayeStorm.shtml>.
- 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. U.P.B. Sci. Bull., Series B, 80(2).
- TIASA. (2001, April). *THERMAL INSULATION HANDBOOK*. Retrieved from https://www.aaamsa.co.za/docs_new/TIASA/Handbook_Chapter1.pd.
- Wonorahardjo S., Sutjahja I.M. (2018). *Bangunan gedung hijau untuk daerah tropis : teori, konsep, dan penerapan*. Bandung: ITB Press.
- Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., Damiati S.A. dan Kurnia D. (2020). Adjustment of indoor temperature using internal thermal mass under different tropical weather conditions. *Science and Technology for the Built Environment*, 26(2), 115-127. doi:<https://doi.org/10.1080/23744731.2019.1608126>
- Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., Mardiyati Y., Andoni H., Achsani R.A., Steven S., Thomas D., Tunçbilek E., Arıcı M., Rahmah N., Tedja S. (2022). Effect of different building façade systems on thermal comfort and urban heat island phenomenon: An experimental analysis. *Building and Environment*, 217, 109063. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109063>
- Wonorahardjo S., Sutjahja I.M., Mardiyati Y., Andoni H., Thomas D., Achsani R.A., Steven S. (2020). Characterising thermal behaviour of buildings and its effect on urban heat island in tropical areas. *Int J Energy Environ Eng*, 11, 129–142. doi:<https://doi.org/10.1007/s40095-019-00317-0>
- 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107632>
- Wonorahardjo, S. (2012). New concepts in districts planning, based on heat island investigation. *Procedia Soc. Behav. Sci.*, 36, 235–242. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.026>
- 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, 95. doi:<https://doi.org/10.3390/buildings8080095>
- Yehuda, S. (2003). *Physics for architects*. USA: Infinity Publishing.com.

CURRICULUM VITAE



Nama : Prof. Dr. Ir. Surjamanto
Wonorahardjo, M.T.
Tempat/tgl lahir : Malang, 27 Maret 1968
Kel. Keahlian : Teknologi Bangunan
Alamat Kantor : Prodi Arsitektur, Jl. Ganesha
10 Bandung 40132
Nama Istri : Prof. Inge Magdalena
Sutjahja S.Si., M.Si., Ph.D.
Nama Anak : 1. Sannia Josephine,
2. Sandia Jonathan,
3. Sanferis Johanesa.

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

No.	Jenjang Pendidikan	Perguruan Tinggi	Tahun Lulus	Gelar	Bidang Keahlian
1	S-1	Universitas Brawijaya	1991	Ir.	Arsitektur
2	S-2	Institut Teknologi Bandung	1997	M.T	Arsitektur
3	S-3	Institut Teknologi Bandung	2010	Dr.	Arsitektur

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

No.	Nama Jabatan	Tahun	Keterangan
1.	Staf Pengajar Prodi Arsitektur, ITB	1995- sekarang	
2	Anggota Satuan Pengawas Internal ITB	2000-2019	
3	Ketua Kelompok Keahlian Teknologi Bangunan	2012 – 2013, 2013 – 2015	SK Dekan SAPPK ITB No: 08/SK/I1.C10/KP/2012 tgl. 2 Januari 2012 SK Rektor ITB No: 269/SK/I1.A/KP/2013 tgl. 29 November 2013 dan SK Dekan SAPPK ITB No: 69/SK/I1.C10/KP/2015 tgl. 27 Mei 2015
4	Kepala Bagian Kawasan Inovasi ITB	2020	SK Rektor ITB No.: 217/IT1.A/SK/KP/2020

No.	Nama Jabatan	Tahun	Keterangan
5	Ketua Kelompok Keahlian Teknologi Bangunan	2023	SK Rektor ITB No.: 1640B/IT1.A/SK-KP/2023
6	Tim Implementasi Proyek ITB Innovation Park Bandung Teknopolis PHLN	2021- sekarang	SK Rektor ITB
7	Tim Implementasi Proyek ITB Innovation Park Bandung Teknopolis SBSN	2021 - sekarang	SK Rektor ITB

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

No.	Pangkat	Golongan	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
4.	Penata Tingkat I	III/d	01-04-2007
5.	Pembina	IV/a	01-10-2013
6.	Pembina Tingkat I	IV/b	01-10-2015
7	Pembina Utama Muda	IV/c	01-10-2023

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	01-04-2013
5	Profesor/Guru Besar	01-03-2023

V. KEGIATAN PENELITIAN

No.	Peneliti, Judul Penelitian	Sumber dana; Tahun
1	Surjamanto Wonorahardjo , Yaseri Dahlia, Peran Faktor-faktor Geometri dan Material Kawasan Perkotaan Berkepadatan Tinggi Terhadap Pembentukan 'Urban Cool Island'	PDD Kemenristekdikti 2023
2	Inge M. Sutjahja, S. Wonorahardjo , Efek Geometri pada Kinerja PCM Organik Berbasis Fatty Acid	PDD Kemendikbudristekdikti 2022
3.	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

No.	Peneliti, Judul Penelitian	Sumber dana; Tahun
4.	Inge M. Sutjahja, S. Wonorahardjo , Efek medan magnetik dan dopan magnetik pada nukleasi material berubah fase untuk optimasi kinerja sistem penyimpanan energi termal	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi Ristekdikti 2020
5.	S. Wonorahardjo , Inge M. Sutjahja, Mardiyati; Pemodelan Smart Insulation untuk Gedung Sebagai Teknologi Mitigasi Local Warming	Riset Multidisiplin ITB 2019
6.	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
7.	S. Wonorahardjo , Inge M. Sutjahja, Daniel Kurnia, Pembuatan Model Manajemen Massa Termal Ruang Menggunakan PCM Berbasis Minyak Kelapa untuk Pengondisian Udara Pasif dan Penghematan Energi Listrik	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (PTUPT); 2018-2019
8.	S. Wonorahardjo , Inge M. Sutjahja, Mardiyati; Metode dan Pembuatan Model Insulasi Termal untuk Teknologi Mitigasi Lingkungan Thermal Perkotaan	Riset Multidisiplin ITB; 2018
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	Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi (PDUPT), Hibah Desentralisasi DIKTI; 2018
10.	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
11.	S. Wonorahardjo , Inge M. Sutjahja, Pembuatan Model Manajemen Massa Termal Ruang Menggunakan PCM Berbasis Minyak Kelapa untuk Pengondisian Udara Pasif dan Penghematan Energi Listrik	Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (PTUPT); 2017-2019
12.	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

No.	Peneliti, Judul Penelitian	Sumber dana; Tahun
13.	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
14.	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
15.	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
16.	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

VI. PUBLIKASI

A. BUKU

No.	Pengarang; Judul Buku	Penerbit/ tahun; ISSN;
1.	Surjamanto Wonorahardjo dan Inge M. Sutjahja; Bangunan Gedung Hijau Untuk Daerah Tropis: Teori, Konsep, dan Penerapan	ITB Press Bandung, 2018. ISBN: 9786025417979

B. JURNAL DAN PROSIDING INTERNASIONAL

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama jurnal; No. Publikasi; Vol./ tahun
1.	Wonorahardjo, S.: "New concepts in districts planning, based on heat island investigation". Putri, W.A., Fahmi, Z., Sutjahja, I.M., Kurnia,	Procedia Soc. Behav. Sci., 36, (2012) 235–242.
2.	D., Wonorahardjo, S.: "Thermophysical parameters of coconut oil and its potential application as the thermal energy storage system in Indonesia".	Journal of Physics: Conference Series, 2016, 739(1), 012065
3.	Sri Rahayu, A.U., Putri, W.A., Sutjahja, I.M., Kurnia, D., Wonorahardjo, S.: "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, 2016, 739(1), 012119

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama jurnal; No. Publikasi; Vol./ tahun
4.	Siti Aisyah Damiati, Sheikh Ahmad Zaki, Hom Bahadur Rijal, Surjamanto Wonorahardjo : "Field study on adaptive thermal comfort in office buildings in Malaysia, Indonesia, Singapore, and Japan during hot and humid season".	Building and Environment 109 (2016) 208-223.
5.	Silalahi, A.O., Sukmawati, N., Sutjahja, I.M., Kurnia, D., Wonorahardjo, S. : "Thermophysical Parameters of Organic PCM Coconut Oil from T-History Method and Its Potential as Thermal Energy Storage in Indonesia".	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 214(1) (2017) 012034
6.	Sutjahja, I.M., Putri, W.A., Fahmi, Z., Wonorahardjo, S. , Kurnia, D.: "Heat exchange studies on coconut oil cells as thermal energy storage for room thermal conditioning".	Journal of Physics: Conference Series, 2017, 877(1), 012038
7.	Surjamanto Wonorahardjo , Inge Magdalena Sutjahja, Daniel Kurnia, Zulfikar Fahmi, Widya Arisya Putri: "Potential of Thermal Energy Storage Using Coconut Oil for Air Temperature Control".	Buildings 8(8), 95 (2018) 1-16.
8.	Sutjahja I.M., Silalahi A.O., Kurnia D., Wonorahardjo S. : "Thermophysical Parameters and Enthalpy-Temperature Curve of Phase Change Material with Supercooling from T-history Data".	U.P.B. Sci. Bull., Series B, 80(2) (2018).
9.	Sutjahja, I.M., Silalahi, A.O., Sukmawati, N., Kurnia, D., Wonorahardjo, S. : "Variation of thermophysical parameters of PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ with dopant from T-history data analysis".	Materials Research Express, 2018, 5(3), 034007
10.	S. Wonorahardjo , I.M. Sutjahja and Daniel Kurnia: "Potential of Coconut Oil for Temperature Regulation in Tropical Houses".	Journal of Engineering Physics and Thermophysics 92 (1) (2019) 80-88.
11.	Sutjahja, I.M., Silalahi, A.O., Wonorahardjo, S. , Kurnia, D.: "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"	Revista Romana de Materiale/ Romanian Journal of Materials 49(2) (2019) 185–192
12.	Sutjahja, I.M., Rahman, A., Putri, R.A., Ahmad Swandi, 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".	Hemjska Industrija 73(6) (2019) 363–374
13.	Silalahi, A.O., Sutjahja, I.M., Kurnia, D., Wonorahardjo, S. : "Thermophysical parameters of organic PCM coconut oil from the T-history method and its variation with the chemical dopant".	Journal of Physics: Conference Series 1204(1) (2019) 012055

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama jurnal; No. Publikasi; Vol./ tahun
14.	Sutjahja, I.M., Silalahi, A.O., Kurnia, D., Wonorahardjo, S. : "The role of particle dopant to the thermal conductivities of PCM coconut oil by means of the T-history method".	Journal of Physics: Conference Series 1204(1) (2019) 012056
15.	Andoni, H., Jurizat, A., Steven, Thomas D., Achsani R.A., Sutjahja I.M., Mardiyati, Wonorahardjo, S. : "Thermal Behaviour Studies on Building Walls based on Type and Composition of the Materials".	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 547(1) (2019) 012058
16.	S. Wonorahardjo , I.M. Sutjahja, Damiaty S.A. and Kurnia D.: "Adjustment of Indoor Temperature using Internal Thermal Mass under Different Tropical Weather Conditions".	Science and Technology for the Built Environment 26(2) (2020) 115-127
17.	Sujamanto Wonorahardjo , Inge Sutjahja, Y. Mardiyanti, H. Andoni, Dixon T, 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
18.	Ekrem Tunçbilek, Muslum Arıcı, Salwa Bouadila, Surjamanto Wonorahardjo ; "Seasonal and annual performance analysis of PCM-integrated building brick under the climatic conditions of Marmara region"	Journal of Thermal Analysis Calorimetry 141 (2020) 613–624.
19.	Thomas, D., Andoni, H., Steven, R.A. Achsani, I.M. Sutjahja, Mardiyati, Wonorahardjo, S. : "Thermophysical studies of common wall panels for controlling building thermal environment".	Materials Today: Proceedings 44 (2020) 3195–3198
20.	Muhammad, F., Wonorahardjo, S.: "Building Material in the Perspective of Energy Efficiency and Thermal Environment in TOD Area".	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 532(1) (2020) 012021
21.	Sutjahja, I.M., Wonorahardjo, S., Wonorahardjo, S. : "Study on physicochemical and thermal properties of tetrabutylammonium-based cation ionic salts induced by Al ₂ O ₃ additive for thermal energy storage application".	Inorganics 8(9) (2020) 51
22.	Surjamanto Wonorahardjo , Inge Magdalena Sutjahja, Ekrem Tunçbilek, Rizky Amalia Achsani, Müslüm Arıcı, Nadiyah 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) 107632 (1-11).

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama jurnal; No. Publikasi; Vol./ tahun
23.	AD Aziiz, S Wonorahardjo , MD Koerniawan: "Effectiveness of double skin façade in controlling indoor air temperature of tropical buildings".	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 152 (1), 012016
24.	Anggraini, Y., Silalahi, A.O., Sutjahja, I.M., Kurnia, D., Viridi, S., Wonorahardjo, S. : "Temperature-dependent thermal conductivity measurement system for various heat transfer fluids".	Instrumentation Mesure Metrologie 20(4) (2021) 195–202
25.	Yusuf, A., Putri, R.A., Rahman, A., Yunita Anggraini, Daniel Kurnia, Wonorahardjo, S., Sutjahja, I.M.: "Time-Controlling the Latent Heat Release of Fatty Acids using Static Electric Field".	Journal of Energy Storage 33 (2021) 102045
26.	Putri, R.A., Yusuf, A., Rahman, A., Yunita Anggraini, Daniel Kurnia, Surjani Wonorahardjo, Wonorahardjo, S. , Sutjahja, I.M.: "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) 103020
27.	Wienty Triyuly, Sugeng Triyadi, Surjamanto Wonorahardjo : "Synergising the thermal behaviour of water bodies within thermal environment of wetland settlements".	International Journal of Energy and Environmental Engineering 12 (2021) 55–68
28.	Rahman, A., Yusuf, A., Putri, R.A., Yunita Anggraini, Febri Berthalita Pujaningsih, -Daniel Kurnia, Wonorahardjo, S. , Sutjahja, I.M.: "Effect of static magnetic field on nucleation of cobalt nitrate hexahydrate".	Materials Research 24(6) (2021) e20210088
29.	Swandi, A., Rahman, A., Putri, R.A., Anggraini, Radhiah, Kurnia, Daniel, Wonorahardjo, S. , Sutjahja, I.M.: "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) 163–174
30.	Triyuly, W., Triyadi, S., Wonorahardjo, S.: "Day and Night Thermal Mass Performance Studies on Wetland Settlement in Palembang".	Journal of Physics: Conference Series 1772(1) (2021) 012029
31.	Jurizat, A., Andoni, H., Sutjahja, I.M., Wonorahardjo, S. : "Cell Sizes Study of Encapsulated Coconut Oil for Heat Exchanger Application".	Journal of Physics: Conference Series 1772(1) (2021) 012010
32.	Nugroho, N.Y., Triyadi, S., Wonorahardjo, S. : "Effect of high-rise buildings on the surrounding thermal environment".	Building and Environment 207 (2022) 108393

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama jurnal; No. Publikasi; Vol./ tahun
33	Wonorahardjo, S. , Sutjahja, I.M., Mardiyati, Y., Andoni H., Achsani R.A., Steven S., Thomas D. , Tunçbilek E., Arıcı M., Rahmah, N., Tedja, S.: “Effect of different building façade systems on thermal comfort and urban heat island phenomenon: An experimental analysis”.	Building and Environment 217 (2022) 109063
34.	Wonorahardjo, S., Dasna, I.W., Sutjahja, I.M., Wonorahardjo, S. , Suharti, S.: “Energy, Chemistry, Ethics, Three Interrelated Domain for Better Living”.	AIP Conference Proceedings 2687 (2023) 040004
35.	Ornam, K., Wonorahardjo, S. , Triyadi, S.: “Several façade types for mitigating urban heat island intensity”.	Building and Environment 248 (2024) 111031
36.	Anggraini, Y., Yusuf, A., Viridi, S., Daniel Kurnia, Wonorahardjo, S. , Sutjahja, I.M.: “Magnetic dopant and field effects on the heat discharge of organic PCM based lauric acid”.	Experimental Thermal and Fluid Science 152 (2024) 111105

C. JURNAL NASIONAL TERAKREDITASI

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama jurnal; No. Publikasi; Vol tahun
1.	IYATI, Wasiska; Wonorahardjo Surjamanto ; Indraprastha Aswin, "Natural Airflow Performances of Double-Skin Façade Types"	DIMENSI, Journal of Architecture and Built Environment, Vol. 41, No. 2, Desember 2014, 65-72
2.	Mohammad Kusyanto, Sugeng Triyadi, Surjamanto Wonorahardjo : “Characterization of the community participation model in the mosque construction process (case study: construction of mosques in Demak Regency)”.	Journal of Islamic Architecture Vol 5, No 3 © 2019
3.	I M Sutjahja, S Assegaf, Surjamanto Wonorahardjo : “Digital Simulation as Learning Aid for Heat Flow in Solid Theoretical Understanding”.	Journal of Physical Science and Engineering Vol. 5, No. 1, 2020, Page 11–21.
4.	Rizki Fitria Madina, Surjamanto Wonorahardjo , F.X. Nugroho Soelami: “Outdoor thermal performance comparison of several glazing types”.	LivaS: International Journal on Livable Space Vol. 04, No.1, February 2019: 22-31.
5.	Floriberta Binarti, Hanson E. Kusuma, Surjamanto Wonorahardjo , Sugeng Triyadi: “PERANAN UNSUR-UNSUR RUANG TERBUKA PADA TINGKAT KENYAMANAN TERMAL OUTDOOR: ANTARA PERSEPSI DAN PENGETAHUAN”.	Jurnal Arsitektur KOMPOSISI Volume 12, Nomor 1, April 2018.

D. JURNAL LAINNYA

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama jurnal; No. Publikasi; Vol tahun
1.	Mohammad Kusyanto, Sugeng Triyadi, and Surjamanto Wonorahardjo : "Kualitas Ruang Masjid Berkubah yang Dibangun Masyarakat Secara Swadaya dari Aspek Kenyamanan Termal di Kabupaten Demak".	Jurnal Lingkungan Binaan Indonesia (JLBI), Vol 6, No 3 (2017) 178-187

VII. PATEN

No.	Judul Paten/HAKI	No Paten/HAKI	Tahun
1.	Dinding untuk mengondisikan Udara Ruang Berbasis Minyak Kelapa dengan Prinsip Pertukaran Kalor Langsung	IDP000089672	21 September 2023
2.	HAKI Panil dinding	ID0031529D	20 Januari 2011
3.	HAKI Jalusi	ID0029511D	20 Januari 2011
4.	Material insulasi termal berbahan dasar campuran limbah kulit jagung-epoksi dan metode pembuatannya	IDP000084779	2023

VIII. PENGHARGAAN

No.	Nama Penghargaan	Pemberi penghargaan	Tahun
1.	Piagam Penghargaan Intitut Teknologi Bandung – Karya Inovasi	Rektor ITB	Maret 2018
2.	Satyalancana Karya Satya X Tahun	Presiden Republik Indonesia	2012
3.	Satyalancana Karya Satya XX Tahun	Presiden Republik Indonesia	2018
4.	Penghargaan Pengabdian 25 Tahun	Rektor ITB	2020

IX. SERTIFIKASI

- Sertifikasi pendidik sebagai dosen profesional 2010

X. PENGABDIAN PADA MASYARAKAT

- Anggota Tim Ahli Bangunan Gedung (TABG) kota Bandung tahun 2014-2017



📍 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 [FgbItb](https://www.facebook.com/FgbItb) [FGB_ITB](https://twitter.com/FGB_ITB)
 [@fgbitb_1920](https://www.instagram.com/fgbitb_1920) [Forum Guru Besar ITB](https://www.youtube.com/ForumGuruBesarITB)

