

# **Pemakaian Teknik Pendinginan Pasif dalam Mitigasi *Urban Heat Island* (UHI): Tinjauan Literatur**

## ***The Use of Passive Cooling Techniques in Urban Heat Island (UHI) Mitigation: Literature Review***

Zuber Angkasa<sup>1</sup>, Sisca Novia Angrini<sup>2</sup>, Sandra Eka Febrina<sup>3</sup>, Iskandar<sup>4</sup>  
<sup>1,2,4</sup>Prodi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palembang  
Jl. A. Yani. 13 Ulu Palembang, Sumatera Selatan 30263

<sup>3</sup>Prodi Arsitektur, Universitas Indo Global Mandiri  
Jl. Jendral Sudirman No. 629 Km. 3.5 Palembang, Sumatera Selatan 11111  
<sup>2</sup>siscaangrini@gmail.com

Genesis Naskah [Diterima 20/6/2023, Disetujui 30/6/2023, Diterbitkan 30/6/2023]

---

---

### **Abstrak**

Dengan berkembangnya wacana pembangunan berkelanjutan, teknik pendinginan aktif perlahan digantikan dengan teknik pendinginan pasif yang lebih sedikit mengkonsumsi energi dalam beroperasi. Di sisi lain, penelitian terdahulu juga telah mengidentifikasi adanya fenomena urban heat island (UHI) yang terjadi di kota-kota besar dunia sebagai dampak dari perubahan iklim. Berbagai upaya dilakukan untuk mengurangi fenomena ini dan teknik pendinginan pasif adalah upaya yang sesuai. Walau begitu, sejauh belum ada tinjauan literatur yang menyeluruh mengenai teknik pendinginan pasif sebagai solusi untuk mengatasi UHI. Karena itu, tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi pemakaian teknik pendingin pasif dalam konteks mitigasi UHI dengan melaksanakan tinjauan sistematis temuan penelitian yang telah ada. Hasil penelitian ini mengindikasikan kelebihan dan kekurangan dari berbagai teknik pendinginan pasif, dengan mempertimbangkan sejumlah faktor yang telah diidentifikasi sebelumnya. Temuan yang diperoleh akan membantu pemerintah dan masyarakat untuk menurunkan UHI menggunakan teknik-teknik pendinginan pasif.

**Kata kunci :** pendinginan pasif; tinjauan sistematis; teknik pendingin; urban heat island

### **Abstract**

*Sustainable development has become a significant issue nowadays. The passive cooling technique is used instead of the active cooling technique for less operation energy consumption. Previous research has identified urban heat island (UHI) phenomena in big cities because of climate change. Efforts have been made to reduce and mitigate this phenomenon, and the passive cooling technique is one of the efforts that count off. A comprehensive literature review has yet to highlight passive cooling techniques to overcome UHI. This paper will systematically review research on passive cooling techniques as UHI mitigation. The result indicates the pros and cons of various passive cooling techniques considering every previously identified factor that will help every stakeholder to reduce and mitigate UHI using passive cooling techniques.*

**Keywords :** cooling techniques; passive cooling; systematic review; urban heat island,

---

---

## **Pendahuluan**

Peningkatan urbanisasi serta aktivitas manusia, industri, dan kendaraan di kawasan perkotaan telah mendorong peningkatan suhu yang menimbulkan ketidaknyamanan dan pemborosan energi di kawasan perkotaan. *Urban heat Island (UHI)* merupakan selisih suhu (atmosferik dan permukaan antar kawasan urban, yang dicirikan oleh struktur terbangun, dan kawasan non-urban, yaitu kawasan tanpa atau minim aktivitas manusia, dapat berupa hutan atau lahan pertanian (Borah, 2020). Yang dimaksud kawasan urban disini adalah daerah yang diakui secara formal sebagai daerah perkotaan. Selisih suhu ini dapat mencapai 3-4°C atau bahkan dapat lebih (Dugolli, 2013).

Studi terhadap fenomena UHI telah sangat lama dilakukan. Studi pertama diterbitkan tahun 1818 oleh Luke Howard dan keluarganya yang mengidentifikasi adanya perbedaan suhu yang signifikan antara Kota London dan kawasan sekitarnya yang tidak dapat diatribusikan kepada sebab-sebab alamiah (Stewart & Mills, 2021). Perbedaan suhu tersebut disebabkan oleh faktor antropogenik, yaitu aktivitas manusia yang intensif di kawasan urban. Pada saat itu, Howard telah berhipotesis bahwa faktor antropogenik tersebut mencakup pemanasan bangunan, hilangnya kawasan hijau, dan penghalangan terhadap ventilasi.

Tinjauan tentang berbagai strategi mitigasi telah dilakukan untuk konteks China (Tian et al., 2021) dan global (Karimi et al., 2022). Sementara itu, studi terkait faktor-faktor pendorong terjadinya UHI secara umum (Vujovic et al., 2021) maupun spesifik seperti polusi (Ulpiani, 2021) juga telah dilakukan. Metode-metode yang digunakan untuk mengestimasi besaran UHI telah pula diteliti (Kim & Brown, 2021a), termasuk teknologi sensor termal jarak jauh (Shi et al., 2021). Studi tinjauan literatur lain memeriksa variasi intensitas UHI di dalam suatu kawasan urban (Kim & Brown, 2021b). Walaupun telah ada sejumlah review seperti di atas, belum ada studi *review* yang fokus hanya pada strategi pendinginan pasif sebagai strategi mitigasi UHI.

Pendinginan pasif merupakan solusi yang paling berkelanjutan karena per definisi, memerlukan energi minimal untuk dapat bekerja. Di sisi lain, fenomena UHI semakin perlu penanganan yang serius mengingat di masa depan, sekitar 70% penduduk Bumi akan tinggal di kawasan urban (Pisello, 2017). Dalam latar belakang tersebut, paper ini bertujuan meninjau *state of the art* mengenai teknik-teknik pendinginan pasif sebagai strategi mitigasi *urban heat island*.

## ***Passive Cooling***

Pendinginan pasif adalah transfer energi dari satu ruang ke ruang lainnya untuk mencapai suatu suhu yang lebih rendah dari lingkungan sekitarnya (Song et al., 2021). Pendinginan ini dikatakan pasif karena menggunakan energi yang minimum. Pendinginan pasif berjalan secara alamiah segera setelah teknik diterapkan pada bangunan. Contoh strategi pendinginan pasif adalah isolasi termal, fasad berventilasi, fasad hijau, dan atap reflektif (Díaz-López et al., 2022). Alternatif dari pendinginan pasif adalah pendinginan proaktif yang memerlukan masukan energi untuk beroperasi. Contoh pendinginan proaktif adalah mesin pendingin ruangan (kipas angin, *air conditioner*) dan *earth to air heat exchanger* (Santamouris et al., 2017).

Pilihan strategi pendinginan pasif yang tepat pada suatu bangunan tergantung pada berbagai parameter desain seperti pola aliran udara di kawasan sekitar, perolehan panas internal bangunan, transfer panas melalui selubung bangunan, dan suhu udara luar dan dalam ruangan (Dugolli, 2023). Pertimbangan yang digunakan untuk memiliki strategi menjadi lebih kompleks ketika pendinginan dilakukan pada level urban, seperti untuk memitigasi *urban heat island* (UHI).

Strategi pendinginan pasif dapat diklasifikasikan berdasarkan tindakan yang diambil untuk mendinginkan. Menurut Freewan (2019), terdapat empat tindakan yang dapat menurunkan panas secara pasif: menyimpan udara dingin di dalam selubung bangunan, menghindari perolehan panas radiasi surya langsung, membuang panas yang

diperoleh dari sumber interior atau eksterior, dan memperlambat transfer panas dari iklim eksternal melalui selubung bangunan. Teknik penyimpanan massa dingin yang umum digunakan adalah *courtyards*, *basements*, ruang tanah, dan massa termal. Sementara itu, teknik penghindaran radiasi dilakukan dengan *shading*, *landscape and trees*, atau pemanfaatan warna dan reflektivitas bahan. Pembuangan perolehan panas dapat dilakukan dengan ventilasi yang terkendali, menara angin, saluran bumi, dan jendela. Teknik pembuangan juga dapat dilakukan melalui pendinginan evaporatif yang mendisipasi panas lewat evaporasi air dan pendinginan radiatif yang mendisipasi panas ke luar angkasa melalui radiasi termal mid-inframerah (Feng et al., 2021). Teknik penghambatan panas dilakukan dengan isolasi atau *double glazing*.

*Passive cooling* memiliki peran penting dalam meningkatkan kinerja energi keseluruhan bangunan sambil memungkinkan kenyamanan dalam ruangan yang lebih baik (Kebir et al., 2022). Pada tingkat urban, *passive cooling* dalam konfigurasi yang tepat mampu memitigasi efek perubahan iklim (Abounaga et al., 2019). Karenanya, *passive cooling* dapat menjadi sistem yang sesuai untuk membantu dalam memitigasi *urban heat island*.

### Metode Penelitian

Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi teknik pendinginan pasif yang dapat memitigasi *urban heat island*. Untuk mendapatkan artikel yang direview, peneliti menggunakan kata kunci: “*passive cooling*” AND “*urban heat island*” pada basis data Scopus. Sebanyak 73 artikel ditemukan menggunakan kedua kata kunci ini pada judul, abstrak, dan *keywords*. Setelah penelusuran lebih lanjut, tiga artikel dibuang karena berbagai alasan. Satu artikel dibuang karena duplikasi, satu karena tidak relevan, dan satu karena bukan berbahasa Inggris. Hasil akhir adalah 70 artikel.

### Hasil

Teknik *passive cooling* yang dijabarkan oleh setiap paper diidentifikasi untuk kemudian diklasifikasi. Total 53 artikel tersebar dari tahun 2007 hingga 2023 dengan puncak publikasi pada tahun 2015-2017 dimana 28 artikel dipublikasikan. Artikel yang dipublikasikan berasal dari 27 negara, sebanyak 11 diantaranya adalah negara-negara Eropa. Hanya ada satu negara Afrika (Burkina Faso), sisanya delapan negara Asia, enam dari Amerika dan satu Australia. Jumlah negara berkembang relatif seimbang dengan negara maju (11 vs 13), namun dari sisi jumlah artikel, paper dari negara maju jauh lebih banyak dari negara berkembang (43 vs 10). Perlu dicatat bahwa negara-negara ini adalah negara asal para periset, bukan negara yang menjadi lokasi riset.

Literatur kemudian dikelompokkan lebih jauh berdasarkan pada jenis pendinginan pasif yang dilakukan berdasarkan pada Freewan (2019), sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Klasifikasi Teknik Pendinginan Pasif

| Strategi                  | Teknik   |
|---------------------------|--|
| 1 Penyimpanan udara sejuk |  |
| <i>Courtyards</i>         | <i>Inner courtyard</i> (López-Cabeza et al., 2022), <i>small courtyard concept</i> (Toe & Kubota, 2015), <i>wooded courtyards</i> (Tsiros et al., 2018)  |
| 2 Penghindaran panas      |  |
| <i>Shading</i>            | <i>Rooftop PV system as shading device</i> (Kaboré et al., 2018), <i>wall shading</i> (Toe & Kubota, 2015), <i>solar shadings</i> (Ascione et al., 2017), <i>well-controlled shading</i> (Rempel et al., 2022), <i>solar control</i> (Gaitani et al., 2011).     |
| Lansekap dan pepohonan    | Natural:<br><i>Alley trees</i> (Szkordilisz & Kiss, 2016), <i>greenery</i> (Imam & Banerjee, 2016; Santamouris et al., 2017) <i>climber greenwalls</i> (Jim, 2015), <i>green spaces</i> (Gaitani et al., 2011; Mitterboeck & Korjenic, 2017), <i>green roofs</i> |

| Strategi                                | Teknik  |
|---|---|
|   | (Kaboré et al., 2020; Poptani & Bandyopadhyay, 2014; Quezada-García et al., 2017; Zinzi & Agnoli, 2012), <i>green infrastructure</i> (Larsen, 2015), <i>green surfaces</i> (Bevacqua et al., 2018), <i>insulated vegetal facade</i> (Olivieri et al., 2014), <i>undamaged intensive green roof</i> (Speak et al., 2013)<br>Manmade materials:<br>Orientation (Tsiros et al., 2018), <i>urban morphology</i> (Gaitani et al., 2011; Galli et al., 2013)  |
| Pemakaian warna dan reflektivitas bahan | Natural:<br><i>Naturally cool, light colored stone for cool roofing and paving application</i> (Rosso et al., 2016), <i>natural materials</i> (Pisello et al., 2016), <i>hygroscopic materials</i> (Zhou et al., 2020).<br>Manmade materials:<br><i>NIR reflective pigments</i> (Rosati et al., 2020), <i>reflective technologies</i> (Santamouris et al., 2017), <i>adaptive cool materials</i> (Fabiani & Pisello, 2021), <i>cool roof</i> (Kaboré et al., 2018, 2017; Kolokotsa et al., 2012; Pisello et al., 2013; Zinzi, 2010; Zinzi & Agnoli, 2012), <i>cool roof with fractal shapes</i> (Sakai et al., 2012), <i>cool materials</i> (Gaitani et al., 2011; Zinzi, 2010), <i>cool coatings</i> (Pisello, 2017), <i>cool concrete</i> (Rosso et al., 2017), <i>cool facades</i> (Doya et al., 2012), <i>cool louvers of shutters</i> (Pisello, 2015a), <i>hydrophilic porous materials</i> (Karamanis, 2015), <i>micro encapsulated phase change materials</i> (MEPCM) (Gopinath et al., 2022), <i>phase change materials</i> (PCM) <i>for cool roof membranes</i> (Saffari et al., 2018), <i>photoluminescent cool materials</i> (Kousis et al., 2021), <i>phosphorescent coatings</i> (Kousis et al., 2021), <i>radiative low-cost coatings</i> (Muselli, 2010), <i>aluminium modified clays for roof surfaces</i> (Vardoulakis et al., 2011), <i>high-albedo coatings</i> (Pisello, 2015b), <i>innovative and traditional roof coating and urban paving</i> (Pisello, 2014), <i>innovative cool roof tiles</i> (Pisello et al., 2014), <i>lotus ceramics</i> (Okada, 2015), <i>modern energy efficient paints</i> (Perdikis, 2017), <i>passive cooling energy-saving roof</i> (Han et al., 2013), <i>waterproof membranes for cool roof application</i> (Pisello et al., 2016) |
| <b>3 Pembuangan Panas</b>               |   |
| Ventilasi                               | <i>Natural ventilation</i> (Kaboré et al., 2017; Palme et al., 2017; Rempel et al., 2022), <i>nocturnal natural ventilation</i> (Erba et al., 2019; Kaboré et al., 2018; Maragogiannis et al., 2011; Toe & Kubota, 2015), <i>window</i> (Toe & Kubota, 2015), <i>wind-based passive cooling</i> (Dugolli, 2013).  |
| Pendinginan evaporatif                  | <i>Evaporative systems</i> (Santamouris et al., 2017), <i>water bodies</i> (Manteghi et al., 2015), <i>water-holding pavements</i> (Nakayama & Fujita, 2010), <i>wetted roofs</i> (Kaboré et al., 2020)   |
| <b>4 Penghambatan Panas</b>             |   |
| Isolasi                                 | Natural:<br><i>Green roof and wall</i> (Imam & Banerjee, 2016)<br>Manmade materials:<br><i>Roof or ceiling insulation</i> (Toe & Kubota, 2015)  |

## Pembahasan

Pembahasan berikut diarahkan pada aspek-aspek yang bermanfaat untuk penerapan teknik tersebut dan memberitahu pengambilan keputusan. Karena alasan ini, kami menyorot pada aspek natural/manmade material, degrees of temperature reduction, relative costs, spatial constraints, dan other co-benefits (beyond heat reduction).

### 1.1 Natural Materials

Sebagian besar teknik pendinginan pasif menggunakan material buatan manusia, khususnya pada courtyard dan lansekap. Teknik berbahan alamiah dapat ditemukan

dalam bentuk vegetasi dan pendinginan evaporatif. Pemakaian warna dan reflektivitas bahan serta isolasi dapat berupa bahan alami dan dapat pula bahan buatan.

Fungsi peneduh dapat dijalankan oleh berbagai benda baik alamiah seperti pepohonan maupun buatan. Ketika vegetasi diterapkan sebagai penutup bagi jalan dan peneduh, tetumbuhan menjalankan fungsi pendinginan secara evaporatif, khususnya dengan bantuan angin dan ketersediaan air tanah yang mencukupi (Imam dan Banerjee, 2016). Keberadaan pohon-pohon peneduh di sepanjang jalan raya, taman, maupun di lahan parkir dapat membantu menurunkan suhu permukaan dan mereduksi perolehan panas gelombang panjang.

Konsep higroskopik yang diangkat oleh Zhou et al. (2020) dalam studi di Zurich mengutamakan bahan-bahan alamiah. Material higroskopik dapat mendinginkan dengan mekanisme desorpsi sehingga menurunkan suhu pada saat gelombang panas sebesar 1,31°C. Material higroskopik adalah material yang mampu menyerap molekul air dari lingkungannya. Material higroskopik memiliki kemampuan membatasi risiko kerusakan terkait kelembaban karena mereduksi fluktuasi kelembaban relatif dalam ruangan. Material ini mendesorpsi uap air ke udara dalam ruangan. Uap air tersebut kemudian menyerap panas untuk mengubah fasenya sehingga menurunkan suhu udara dalam ruangan. Material higroskopik dan PCM memiliki prinsip pendinginan yang sama yaitu memanfaatkan panas laten perubahan fase. Sementara PCM menggantungkan pelepasan dan absorpsi energinya pada suhu perubahan fase, materi higroskopik tidak tergantung pada suhu, tetapi pada kondisi kelembaban dalam material tersebut. Jika tekanan uap air di dalam bahan lebih rendah daripada tekanan di udara, maka proses desorpsi terjadi dan memunculkan efek pendinginan. Contoh material higroskopik adalah bata tanah, bata rami, plester tanah liat, dan kayu. Jadi material ini sebenarnya material-material tradisional yang kembali menjadi populer karena sifatnya yang alamiah, ramah lingkungan, murah, serta dapat dengan mudah diintegrasikan ke dalam selubung bangunan.

Masih banyak sebenarnya jenis-jenis material alamiah yang telah dieksplorasi untuk tujuan mereduksi beban pendinginan, meningkatkan kondisi kenyamanan termal, dan menghemat energi bangunan. Bahan-bahan ini merupakan pelapis albedo tinggi berbasis pengikat-pengikat tradisional seperti *waterglass*, *lime*, *natural pozzolans*, atau pigmen sintesis dan alami seperti burnt sienna, dan bahan dengan sumberdaya yang tak terbatas seperti pasir (Perdikis, 2016).

Ventilasi alami nokturnal (malam hari) merupakan salah satu metode dalam mitigasi UHI dengan cara membuang perolehan panas. Ketimbang menolak panas seperti atap dingin, ventilasi menerima panas namun membuangnya ke lingkungan dengan cepat. Studi menunjukkan bahwa ventilasi alami pada malam hari lebih efisien dalam mereduksi pemanasan dalam ruangan dibandingkan atap dingin (Kabore et al., 2018). Ventilasi alami nokturnal dapat dicapai menggunakan *skylight* pada bangunan vertikal. Ventilasi ini akan mendinginkan permukaan bangunan dan elemen-elemen strukturalnya, lebih baik dari cool roof jika bangunan diisolasi (Kabore et al., 2017). Ventilasi alami nokturnal dapat menurunkan UHI karena adanya udara ambien dingin yang masuk ke dalam bangunan, khususnya ketika musim panas dimana suhu ambien luar lebih rendah daripada dalam ruangan (Maragogiannis et al., 2011).

Penentuan sistem ventilasi alamiah melalui jendela yang tepat dapat mereduksi kebutuhan pendinginan suatu bangunan. Sebagai contoh, penelitian di Chile menemukan bahwa sistem ventilasi alamiah dapat mengurangi 30% permintaan pendinginan bangunan, sehingga berkontribusi pada penurunan UHI dan reduksi emisi gas (Palme et al., 2017).

### **1.2 Degrees of Temperature Reduction**

Pisello et al. (2014) mendesain suatu brick tile yang mampu mengoptimalkan kinerja atap dingin dalam aspek indeks refleksi surya. Brick tile ini memiliki warna yang ringan, sangat reflektif, dan memiliki emisivitas tinggi.

Teknologi lain adalah phase change material (PCM), khususnya dalam bentuk mikro (*MEPCM – Micro Encapsulated PCM*) (Gopinath et al., 2022). PCM merupakan material yang memiliki kapasitas panas laten yang tinggi sehingga mampu mengakumulasi energi dalam jumlah besar dalam selang suhu yang kecil. PCM yang digunakan sebagai membran bagi atap dingin mampu mereduksi stress termal lebih jauh lagi.

Kadangkala, bahan yang lebih sederhana juga dapat berpotensi mendinginkan lingkungan. Studi oleh Verdoulakis et al. (2011) mengembangkan tanah liat yang dimodifikasi dengan aluminium untuk diterapkan sebagai pendingin surya pada permukaan atap. Tanah liat ini dapat mereduksi suhu dengan cara evaporatif dan desorpsi dengan pengaruh minor dari refleksi surya.

Pendinginan terbaik diberikan jika atap dingin dikombinasikan dengan teknologi aktif. Pendinginan aktif yang dilakukan oleh atap dingin adalah dengan menurunkan suhu udara penyedot dari unit eksternal pompa panas ketika unit ini dipasang di atap. Ini berarti mesin pendingin memerlukan energi yang lebih sedikit karena angkatan suhu antara sumber dan luaran yang rendah. Studi menunjukkan bahwa aksi ganda pendinginan aktif-pasif atap dingin mampu menurunkan pemanasan atap hingga 20°C dan kebutuhan energi untuk pendinginan menurun hingga 34% (Pisello et al., 2013).

Nakayama dan Fujita (2010) meneliti kemampuan dari trotoar penampung air dari bahan jenis baru untuk menurunkan panas di kawasan urban. Bahan ini adalah aspal berpori dan pengisi penahan air yang dibuat dari produk sampingan baja berbasis senyawa silika. Jadi, bahan yang digunakan tetap berupa aspal, tapi alih-alih menyerap dan melepas panas, aspal ini menyerap panas dan menurunkannya dengan air yang tersimpan di dalam pengisi, menimbulkan evaporasi yang mendinginkan udara. Hasil penelitian menunjukkan kalau suhu udara di atas trotoar penahan air mencapai 1-2°C lebih rendah dari suhu udara di atas halaman dan 3-5°C lebih rendah dari di atas atap gedung.

### **1.3 Relative Costs**

Isolasi merupakan teknik yang sederhana untuk diterapkan, umumnya pada bangunan non residensial dimana luas atap lebih besar dari luas permukaan dinding eksternal bangunan. Walau begitu, solusi bahan isolasi konvensional, biasanya papan isolasi, berbiaya mahal dan memiliki dampak lingkungan dengan justru meningkatkan UHI. Untuk mengatasi masalah-masalah ini, teknik pelapisan dengan bahan putih atau penggantian bahan isolasi dengan material hijau dapat dilakukan.

Tanaman yang ditanam di dinding juga bertindak sebagai isolasi dan mereduksi transmisi panas ke dalam ruangan. Daya isolasinya sebanding dengan luas permukaan yang ditutupi tanaman. Studi menunjukkan kalau dinding hijau dapat mereduksi hingga 33% absorpsi permukaan dinding terhadap sinar matahari (Imam & Benerjee, 2016). Walau begitu, ada risiko kerusakan struktur dinding bangunan karena tanaman menimbulkan kelembaban, apalagi di negara dengan iklim lembab. Kekurangan ini meningkatkan biaya perawatan. Solusi yang ditawarkan adalah dengan tidak menempelkan tanaman pada dinding namun membuat kerangka sendiri bagi tanaman sehingga tanaman tidak benar-benar menyentuh dinding.

Penerapan finishing vegetal yang terbentuk oleh tanaman dan substrat pada kinerja energi termal fasad terisolasi pada kondisi musim panas di zona iklim Mediterania menunjukkan efek yang sangat positif (Olivieri et al., 2014). Walaupun fasad terisolasi, karena sifatnya, memiliki resistensi termal yang tinggi, vegetasi mampu membantu menurunkan suhu fasad sehingga mengurangi konsumsi energi untuk pendinginan dan

meningkatkan kenyamanan pemakai bangunan. Artinya, secara tidak langsung, vegetasi menurunkan permintaan energi untuk kebutuhan pendinginan, sehingga mengurangi emisi karbon dari pembangkit listrik (Imam & Banerjee, 2016).

Sejumlah riset melakukan inovasi material untuk meningkatkan kinerja lebih jauh sekaligus menurunkan biaya. Muselli (2010) menawarkan material pelapis radiatif baru berbiaya murah yang memungkinkan pembatasan perolehan panas sepanjang siang-malam pada musim panas. Peneliti membandingkan empat jenis permukaan atap yang dibagi menjadi dua kondisi masing-masing yaitu dengan pelapis dan tanpa pelapis. Ditemukan bahwa efisiensi terbaik ditunjukkan oleh corrugated sheets yang dilapis material baru berwarna putih, yaitu sebesar 34%. Atap reflektif buram putih baru ini dapat mereduksi konsumsi energi pendingin sebanyak 26-49%.

#### **1.4 Spatial Constraints**

Beberapa teknik mitigasi UHI menggunakan pendekatan passive cooling memerlukan ruangan yang besar. Teknik vegetasi untuk membuat lajur pepohonan memerlukan ruangan besar untuk ruang gerak bagi pertumbuhan kanopi pohon. Teknik ini cocok dilakukan pada level urban. Sebuah studi menyorot pada makna penting *alley trees* sebagai mitigasi UHI (Szkordilisz & Kiss, 2016). Para peneliti membandingkan empat situasi: bangunan tanpa pohon, bangunan dengan *Celtis occidentalis* (tinggi 15,5 meter, tinggi pokok 2,4 meter, radius kanopi 6,55 meter, transmisivitas 11,3%), bangunan dengan *Tilia cordata* (tinggi 9,6 m, tinggi pokok 2,3 m, radius kanopi 3,65 m, transmisivitas 12,0%), dan bangunan dengan *Sophora japonica* (tinggi total 8,1 m, tinggi pokok 2,4 m, dan radius kanopi 2,85 m, transmisivitas 16,6%). Keempatnya berlokasi di Kota Szeged, Hungaria. Pengukuran pada dua hari dalam cuaca cerah menunjukkan bahwa rumah yang dinaungi oleh *Celtis occidentalis* memiliki reduksi perolehan surya terbanyak, yaitu sebesar 60% pada permukaan vertikal dan 29% pada permukaan horizontal. Pohon ini adalah pohon tertinggi dengan radius kanopi terlebar dan transmisivitas terkecil. Simulasi menunjukkan kalau penurunan perolehan surya tersebut berdampak pada peningkatan kenyamanan dalam ruangan pada bangunan-bangunan yang dinaungi.

Studi pada empat kota besar di India oleh Imam dan Banerjee (2016) menghasilkan tujuh rekomendasi untuk memaksimalkan keberlanjutan alamiah kota-kota di negara berkembang, khususnya dalam menangkal UHI. Ketujuh rekomendasi ini adalah: (1) urbanisasi harus dikomplemen dengan program aforestrasi yang memiliki target yang jelas berupa jumlah pohon yang harus ditanam, (2) penghijauan koridor transportasi untuk mereduksi pencemaran atmosfer, (3) transportasi publik dan pemakaian bahan bakar berkelanjutan harus didorong untuk mereduksi emisi dari kendaraan pribadi, (4) peningkatan jumlah taman privat, (5) partisipasi publik untuk aforestrasi, (6) pengembangan ruang hijau urban yang diselaraskan dengan tata lansekap strategis untuk memaksimalkan penghijauan, dan (7) pendataan pohon di kawasan urban beserta nilai fisik, ekonomis, dan ekologisnya untuk dimanfaatkan dalam program penghijauan.

Teknik menggunakan evaporasi memerlukan ruangan yang besar pula. Jangkauan pendinginan dari badan air dipengaruhi oleh luas badan air itu sendiri. Selain itu, tingkat evaporasi juga dipengaruhi oleh situasi lingkungan sekitar seperti turbulensi angin, kecepatan angin, suhu, kelembaban, dan arah angin. Walau begitu, belum ada penelitian teoritis yang cukup detail terkait dampak air terhadap pendinginan maupun eksplorasi terhadap peran geometri kota seperti indeks bentuk lansekap, proporsi bangunan di sekitar badan air, dan jarak badan air dari pusat kota (Manteghi et al., 2015).

Material hijau memerlukan ruangan yang kecil sehingga dapat dipasang di lokasi sempit. Walau begitu, kelemahan dari semua material dingin adalah masalah kesilauan, khususnya jika dipasang pada ketinggian yang rendah di lingkungan terbangun yang tidak ternaung. Lagi pula, material dingin dinilai tidak memiliki nilai estetika atau kultural

setinggi material berwarna, sehingga kurang menarik untuk digunakan di lingkungan urban.

### **1.5 Other Co-benefits**

Teknik pendingin berbasis ruang seperti *courtyard* dan ruang terbuka hijau memiliki manfaat lain pada psikologi dan sosiologi manusia. Strategi vegetasi berupa atap hijau dapat membantu menjadi media retensi air, penyaring polutan di udara, serta meningkatkan daya tarik estetik bangunan. Daya tarik estetik dapat pula ditambah dengan perubahan warna secara dinamis. Teknik lain yang memberikan fungsi tambahan berupa peningkatan estetika adalah atap basah. Sementara beberapa teknik memberikan manfaat tambahan pada psikososial manusia, beberapa lainnya memberikan manfaat pada aspek energi seperti sistem *PV (photovoltaic)* yang dipasang di atap dapat menjalani fungsi sebagai peneduh, sementara kita ketahui bahwa sistem ini berfungsi sebagai pembangkit energi listrik.

Teknik luminesensi memberikan manfaat tambahan berupa pencahayaan yang berkelanjutan sehingga dapat menggantikan fungsi lampu. Material ini akan mengeksitasi elektron ke tingkat energi yang lebih tinggi karena proses pelarangan spin setelah discharge dalam radiasi dengan panjang gelombang pendek. Pada momen tertentu di perkotaan, peningkatan suhu mungkin dibutuhkan, khususnya di musim dingin. Ketika suhu udara di luar lebih dingin dari suhu air, efek pendinginan air menghilang dan air justru menimbulkan efek menghangatkan karena mentransfer panas ke lingkungan sekitar yang lebih dingin.

### **Simpulan**

Dalam paper ini proses pengumpulan menghasilkan 53 paper yang dapat direview. Kebanyakan riset dilakukan di negara-negara Eropa, khususnya di kawasan beriklim Mediterania seperti Perancis selatan, Italia, dan Yunani. Padahal, sebagian besar manusia dan kota-kota terpadat di dunia ada di kawasan Asia Timur, Selatan, dan Tenggara. Karena itu, masih diperlukan riset-riset baru mengenai inovasi pendinginan pasif maupun efektivitasnya dalam mendinginkan suhu di lingkungan urban di tiga kawasan terpadat dunia tersebut.

Terkait metode yang efektif, masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangannya. teknologi pelapis cerdas dan dingin sangat menjanjikan, terlebih jika dapat diproduksi secara massal. Teknologi ini terus berkembang dan mengatasi kendala-kendala sebelumnya yang tidak dapat dilalui oleh metode tradisional seperti teknik hijau dan biru. Kombinasi teknologi putih (dingin) dengan teknik hijau dan biru, serta teknik yang lebih integratif seperti tata kelola ruang kota dan perubahan perilaku masyarakat urban dapat memberikan efek maksimal dalam reduksi suhu kota.

Karena itu, penelitian ini menyarankan agar pemerintah dan pengembang gedung di kawasan perkotaan untuk direncanakan dengan hati-hati menggunakan teknik pendinginan pasif yang tepat agar gedung tidak memberikan efek *urban heat island* dan justru menjadi *urban green island*.

### **Daftar Pustaka**

- Aboulnaga, M., Alwan, A., & R. Elsharouny, M. (2019). Climate Change Adaptation: Assessment and Simulation for Hot-Arid Urban Settlements – The Case Study of the Asmarat Housing Project in Cairo, Egypt. In A. Sayigh (Ed.), *Sustainable Building for a Cleaner Environment* (pp. 437–449). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-94595-8\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-319-94595-8_37)
- Ascione, F., Böttcher, O., Kaltenbrunner, R., & Vanoli, G. P. (2017). Methodology of the cost-optimality for improving the indoor thermal environment during the warm



- season. Presentation of the method and application to a new multi-storey building in Berlin. *Applied Energy*, 185, 1529–1541. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.169>
- Bevacqua, M., Grossi, G., Fionda, M. P., & Arcuri, N. (2018). Passive Cooling Techniques for Less Energy Consumption in Buildings a Comparative Study on Green Surfaces. *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8494625>
- Borah, R. (2020). Development of Urban Heat Island and Its Relation to Heat Waves. In R. B. Singh, B. Srinagesh, & S. Anand (Eds.), *Urban Health Risk and Resilience in Asian Cities* (pp. 127–142). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-1205-6>
- Doya, M., Bozonnet, E., & Allard, F. (2012). Experimental measurement of cool facades' performance in a dense urban environment. *Energy and Buildings*, 55, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.001>
- Dugolli, M. (2013). Urban Heat Island and Passive Cooling. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(8), 181–184. <https://doi.org/10.3182/20130606-3-XK-4037.00011>
- Dugolli, M. (2023). Energy efficient cooling through natural ventilation in Kosovo. *Journal of Energy Systems*, 30–45. <https://doi.org/10.30521/jes.1090315>
- Erba, S., Sangalli, A., & Pagliano, L. (2019). Present and future potential of natural night ventilation in nZEBs. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 296(1), 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/296/1/012041>
- Fabiani, C., & Pisello, A. L. (2021). Passive cooling by means of adaptive cool materials. In *Eco-efficient Materials for Reducing Cooling Needs in Buildings and Construction: Design, Properties and Applications* (pp. 439–457). Woodhead.
- Feng, C., Yang, P., Liu, H., Mao, M., Liu, Y., Xue, T., Fu, J., Cheng, T., Hu, X., Fan, H. J., & Liu, K. (2021). Bilayer porous polymer for efficient passive building cooling. *Nano Energy*, 85, 105971. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105971>
- Freewan, A. A. Y. (2019). Advances in Passive Cooling Design: An Integrated Design Approach. In G. Hailu (Ed.), *Zero and Net Zero Energy*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87123>
- Gaitani, N., Spanou, A., Saliari, M., Synnefa, A., Vassilakopoulou, K., Papadopoulou, K., Pavlou, K., Santamouris, M., Papaioannou, M., & Lagoudaki, A. (2011). Improving the microclimate in urban areas: A case study in the centre of Athens. *Building Services Engineering Research and Technology*, 32(1), 53–71. <https://doi.org/10.1177/0143624410394518>
- Galli, G., Vallati, A., Recchiuti, C., de Lieto Vollaro, R., & Botta, F. (2013). Passive cooling design options to improve thermal comfort in an Urban District of Rome, under hot summer conditions. *International Journal of Engineering & Technology*, 5(5), 4495–4500.
- Gopinath, G. R., Muthuvel, S., Vijayrakesh, K., & Ashok Kumar, B. J. (2022). A short review on measuring impact of microencapsulated phase change material in mitigating urban heat island. *Materials Today: Proceedings*, 60, 1905–1908. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.570>
- Han, R. B., Xu, Z. M., Long, E. S., & Wang, Y. (2013). A Study on the Energy-Saving Reconstruction of the Roof of Existing Building. *Applied Mechanics and Materials*, 361–363, 440–443. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.361-363.440>
- Imam, A. U. K., & Banerjee, U. K. (2016). Urbanisation and greening of Indian cities: Problems, practices, and policies. *Ambio*, 45(4), 442–457. <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0763-4>

- Jim, C. Y. (2015). Thermal performance of climber greenwalls: Effects of solar irradiance and orientation. *Applied Energy*, 154, 631–643. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.077>
- Kaboré, M., Bozonnet, E., & Salagnac, P. (2020). Building and Urban Cooling Performance Indexes of Wetted and Green Roofs—A Case Study under Current and Future Climates. *Energies*, 13(23), 6192. <https://doi.org/10.3390/en13236192>
- Kaboré, M., Bozonnet, E., Salagnac, P., & Abadie, M. (2018). Indexes for passive building design in urban context – indoor and outdoor cooling potentials. *Energy and Buildings*, 173, 315–325. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.043>
- Kaboré, M., Bozonnet, E., Salagnac, P., Abadie, M., & Perrin, R. (2017). *Cool roof and natural ventilation for UHI mitigation and indoor comfort – cooling indicators for a commercial building*. 33rd Passive and Low Energy Architecture Conference, Edinburgh.
- Karamanis, D. (2015). Solar cooling with hydrophilic porous materials for reducing building cooling needs. In *Eco-Efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs: Design, Properties and Applications* (pp. 269–305). Elsevier.
- Karimi, A., Mohammad, P., García-Martínez, A., Moreno-Rangel, D., Gachkar, D., & Gachkar, S. (2022). New developments and future challenges in reducing and controlling heat island effect in urban areas. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02530-0>
- Kebir, N., Miranda, N. D., Sedki, L., Hirmer, S., & McCulloch, M. (2022). Opportunities stemming from retrofitting low-resource East African dwellings by introducing passive cooling and daylighting measures. *Energy for Sustainable Development*, 69, 179–191. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.06.007>
- Kim, S. W., & Brown, R. D. (2021a). Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. *Science of The Total Environment*, 779, 146389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146389>
- Kim, S. W., & Brown, R. D. (2021b). Urban heat island (UHI) variations within a city boundary: A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111256. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111256>
- Kolokotsa, D., Diakaki, C., Papantoniou, S., & Vlissidis, A. (2012). Numerical and experimental analysis of cool roofs application on a laboratory building in Iraklion, Crete, Greece. *Energy and Buildings*, 55, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.011>
- Kousis, I., Fabiani, C., & Pisello, A. L. (2021). A study on the thermo-optical behaviour of phosphorescent coatings for passive cooling applications. *E3S Web of Conferences*, 238, 06002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123806002>
- Larsen, L. (2015). Urban climate and adaptation strategies. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13(9), 486–492. <https://doi.org/10.1890/150103>
- López-Cabeza, V. P., Lizana, J., Diz-Mellado, E., Rivera-Gómez, C., & Galán-Marín, C. (2022). Outdoor Microclimate Influence on Building Performance: Simulation Tools, Challenges, and Opportunities. In D. Bienvenido-Huertas & J. Moyano-Campos (Eds.), *New Technologies in Building and Construction* (Vol. 258, pp. 103–121). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-1894-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-19-1894-0_7)
- Manapragada, N. V. S. K., & Pignatta, G. (2021). Climate-Adaptive Building Skins for Building Energy Conservation and Uhi Mitigation: Transient Building Energy Simulation with Thermochromic Coatings. *Proceedings of the CEES. Construction, Energy, Environment, & Sustainability (CEES) International Conference 2020, Coimbra, Portugal*.
- Manteghi, G., Limit, H. B., & Remaz, D. (2015). Water Bodies an Urban Microclimate: A Review. *Modern Applied Science*, 9(6), p1. <https://doi.org/10.5539/mas.v9n6p1>

- Maragogiannis, K., Kolokotsa, D., & Maria, E.-A. (2011). Study of Night Ventilation Efficiency in Urban Environment: Technical and Legal Aspects. *Scientific Journal of Riga Technical University. Environmental and Climate Technologies*, 6(1). <https://doi.org/10.2478/v10145-011-0007-1>
- Mitterboeck, M., & Korjenic, A. (2017). Analysis for improving the passive cooling of building's surroundings through the creation of green spaces in the urban built-up area. *Energy and Buildings*, 148, 166–181. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.005>
- Muselli, M. (2010). Passive cooling for air-conditioning energy savings with new radiative low-cost coatings. *Energy and Buildings*, 42(6), 945–954. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.006>
- Nakayama, T., & Fujita, T. (2010). Cooling effect of water-holding pavements made of new materials on water and heat budgets in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 96(2), 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.02.003>
- Okada, K. (2015). Lotus ceramics for counteracting urban heat island effects. In *Eco-Efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs* (pp. 195–213). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-380-5.00007-8>
- Olivieri, F., Olivieri, L., & Neila, J. (2014). Experimental study of the thermal-energy performance of an insulated vegetal façade under summer conditions in a continental mediterranean climate. *Building and Environment*, 77, 61–76. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.019>
- Palme, M., Carrasco, C., & Gálvez, M. A. (2017). *The Pacific Breezes: Estimation of the overheating risk and the natural ventilation potential for buildings in cities of the Chilean Pacific Coast*. 33rd Passive and Low Energy Architecture Conference, Edinburgh.
- Perdikis, P. (2017). Cooling the Future: Bridging architectural aspects from the past with modern energy efficient paints. In Y. Bahei-El-Din & M. Hassan (Eds.), *Advanced Technologies for Sustainable Systems* (Vol. 4, pp. 99–108). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48725-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48725-0_11)
- Pisello, A. (2015). Experimental Analysis of Cool Traditional Solar Shading Systems for Residential Buildings. *Energies*, 8(3), 2197–2210. <https://doi.org/10.3390/en8032197>
- Pisello, A. L. (2014). Optic-Energy Performance of Innovative and Traditional Materials for Roof Covering in Commercial Buildings in Central Italy. *Advanced Materials Research*, 884–885, 685–688. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.884-885.685>
- Pisello, A. L. (2015). High-albedo roof coatings for reducing building cooling needs. In *Eco-Efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs: Design, Properties and Applications* (pp. 243–268). Elsevier.
- Pisello, A. L. (2017). State of the art on the development of cool coatings for buildings and cities. *Solar Energy*, 144, 660–680. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.068>
- Pisello, A. L., Castaldo, V. L., Pignatta, G., Cotana, F., & Santamouris, M. (2016). Experimental in-lab and in-field analysis of waterproof membranes for cool roof application and urban heat island mitigation. *Energy and Buildings*, 114, 180–190. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.026>
- Pisello, A. L., & Rosso, F. (2015). Natural Materials for Thermal Insulation and Passive Cooling Application. *Key Engineering Materials*, 666, 1–16. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.666.1>
- Pisello, A. L., Santamouris, M., & Cotana, F. (2013). Active cool roof effect: Impact of cool roofs on cooling system efficiency. *Advances in Building Energy Research*, 7(2), 209–221. <https://doi.org/10.1080/17512549.2013.865560>

- Pisello, A., Rossi, F., & Cotana, F. (2014). Summer and Winter Effect of Innovative Cool Roof Tiles on the Dynamic Thermal Behavior of Buildings. *Energies*, 7(4), 2343–2361. <https://doi.org/10.3390/en7042343>
- Poptani, H., & Bandyopadhyay, A. (2014). *Extensive Green Roofs: Potential for Thermal and Energy benefits in buildings in central India*. 30th International PLEA Conference, CEPT University, Ahmedabad.
- Quezada-García, S., Espinosa-Paredes, G., Escobedo-Izquierdo, M. A., Vázquez-Rodríguez, A., Vázquez-Rodríguez, R., & Ambriz-García, J. J. (2017). Heterogeneous model for heat transfer in Green Roof Systems. *Energy and Buildings*, 139, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.015>
- Rempel, A. R., Danis, J., Rempel, A. W., Fowler, M., & Mishra, S. (2022). Improving the passive survivability of residential buildings during extreme heat events in the Pacific Northwest. *Applied Energy*, 321, 119323. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119323>
- Rosati, A., Fedel, M., & Rossi, S. (2020). NIR reflective pigments to mitigate the urban heat islands effect (UHIE). *E3S Web of Conferences*, 172, 03006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017203006>
- Rosso, F., Pisello, A. L., Castaldo, V. L., Cotana, F., & Ferrero, M. (2017). Smart cool mortar for passive cooling of historical and existing buildings: Experimental analysis and dynamic simulation. *Energy Procedia*, 134, 536–544. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.560>
- Rosso, F., Pisello, A. L., Castaldo, V. L., Fabiani, C., Cotana, F., Ferrero, M., & Jin, W. (2017). New cool concrete for building envelopes and urban paving: Optics-energy and thermal assessment in dynamic conditions. *Energy and Buildings*, 151, 381–392. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.051>
- Rosso, F., Pisello, A. L., Cotana, F., & Ferrero, M. (2016). On the thermal and visual pedestrians' perception about cool natural stones for urban paving: A field survey in summer conditions. *Building and Environment*, 107, 198–214. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.028>
- Saffari, M., Piselli, C., de Gracia, A., Pisello, A. L., Cotana, F., & Cabeza, L. F. (2018). Thermal stress reduction in cool roof membranes using phase change materials (PCM). *Energy and Buildings*, 158, 1097–1105. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.068>
- Sakai, S., Nakamura, M., Furuya, K., Amemura, N., Onishi, M., Iizawa, I., Nakata, J., Yamaji, K., Asano, R., & Tamotsu, K. (2012). Sierpinski's forest: New technology of cool roof with fractal shapes. *Energy and Buildings*, 55, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.052>
- Santamouris, M., Ding, L., Fiorito, F., Oldfield, P., Osmond, P., Paolini, R., Prasad, D., & Synnefa, A. (2017). Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy*, 154, 14–33. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.006>
- Shi, H., Xian, G., Auch, R., Gallo, K., & Zhou, Q. (2021). Urban Heat Island and Its Regional Impacts Using Remotely Sensed Thermal Data—A Review of Recent Developments and Methodology. *Land*, 10(8), 867. <https://doi.org/10.3390/land10080867>
- Song, Y., Darani, K. S., Khdair, A. I., Abu-Rumman, G., & Kalbasi, R. (2021). A review on conventional passive cooling methods applicable to arid and warm climates considering economic cost and efficiency analysis in resource-based cities. *Energy Reports*, 7, 2784–2820. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.056>
- Soudian, S., Berardi, U., & Laschuk, N. (2020). Development and thermal-optical characterization of a cementitious plaster with phase change materials and

- thermochromic paint. *Solar Energy*, 205, 282–291. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.015>
- Speak, A. F., Rothwell, J. J., Lindley, S. J., & Smith, C. L. (2013). Reduction of the urban cooling effects of an intensive green roof due to vegetation damage. *Urban Climate*, 3, 40–55. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.01.001>
- Stewart, I. D., & Mills, G. (2021). *The Urban Heat Island*. Elsevier.
- Szkordilisz, F., & Kiss, M. (2016). Passive cooling potential of alley trees and their impact on indoor comfort. *Pollack Periodica*, 11(1), 101–112. <https://doi.org/10.1556/606.2016.11.1.10>
- Tian, L., Li, Y., Lu, J., & Wang, J. (2021). Review on Urban Heat Island in China: Methods, Its Impact on Buildings Energy Demand and Mitigation Strategies. *Sustainability*, 13(2), 762. <https://doi.org/10.3390/su13020762>
- Toe, D. H. C., & Kubota, T. (2015). Comparative assessment of vernacular passive cooling techniques for improving indoor thermal comfort of modern terraced houses in hot-humid climate of Malaysia. *Solar Energy*, 114, 229–258. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.035>
- Tsiros, I. X., Hoffman, M. E., Tseliou, A., Christopoulou, V., & Lykoudis, S. (2018). An assessment to evaluate potential passive cooling patterns for climate change adaptation in a residential neighbourhood of a Mediterranean coastal city (Athens, Greece). *International Journal of Global Warming*, 16(2), 181. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2018.094557>
- Ulpiani, G. (2021). On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework. *Science of The Total Environment*, 751, 141727. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141727>
- Vardoulakis, E., Karamanis, D., Assimakopoulos, M. N., & Mihalakakou, G. (2011). Solar cooling with aluminium pillared clays. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(8), 2363–2370. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.04.007>
- Vera, S., Pinto, C., Tabares-Velasco, P. C., Bustamante, W., Victorero, F., Gironás, J., & Bonilla, C. A. (2017). Influence of vegetation, substrate, and thermal insulation of an extensive vegetated roof on the thermal performance of retail stores in semiarid and marine climates. *Energy and Buildings*, 146, 312–321. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.037>
- Vujovic, S., Haddad, B., Karaky, H., Sebaibi, N., & Boutouil, M. (2021). Urban Heat Island: Causes, Consequences, and Mitigation Measures with Emphasis on Reflective and Permeable Pavements. *CivilEng*, 2(2), 459–484. <https://doi.org/10.3390/civileng2020026>
- Yang, J., Wang, Z.-H., & Kaloush, K. E. (2015). Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a ‘silver bullet’ for mitigating urban heat island? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 830–843. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.092>
- Zhou, X., Carmeliet, J., Sulzer, M., & Derome, D. (2020). Energy-efficient mitigation measures for improving indoor thermal comfort during heat waves. *Applied Energy*, 278, 115620. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115620>
- Zinzi, M. (2010). Cool materials and cool roofs: Potentialities in Mediterranean buildings. *Advances in Building Energy Research*, 4(1), 201–266. <https://doi.org/10.3763/aber.2009.0407>
- Zinzi, M., & Agnoli, S. (2012). Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings*, 55, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.024>