

Pengaruh Kondisi Permukaan Perkerasan terhadap Kinerja Pendinginan *Heat-Reflective Coatings* dalam Mitigasi *Urban Heat Island*

Anandityo Rama Aji¹, Taqia Rahman^{1*}, Mukhammad Rizka Fahmi Amrozi¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: taqia.rahman@ugm.ac.id

INTISARI

Penelitian ini mengevaluasi durabilitas dan kinerja pendinginan *heat-reflective coatings* (HRC) pada perkerasan jalan dalam mitigasi *Urban Heat Island* (UHI). HRC bekerja dengan meningkatkan albedo permukaan untuk memantulkan radiasi matahari dan mengurangi panas yang terserap, sehingga dapat menurunkan suhu permukaan secara signifikan. Evaluasi dilakukan pada berbagai kondisi permukaan baru, *aging* (menua), berdebu, dan basah untuk meniru kondisi nyata di lapangan. Hasilnya menunjukkan bahwa semua HRC efektif menurunkan suhu perkerasan dibandingkan tanpa pelapis. Meskipun kondisi *aging* dan berdebu umumnya menurunkan efisiensi reflektif akibat degradasi permukaan atau penghambatan oleh debu, beberapa material seperti Becool dan Emulsi Akrilik Hijau justru menunjukkan peningkatan efisiensi yang signifikan pada kondisi tersebut. Sebaliknya, pada kondisi basah, semua material pelapis menunjukkan peningkatan performa pendinginan yang konsisten, kemungkinan besar karena efek pendinginan evaporatif. Oleh karena itu, pemilihan material HRC yang tahan terhadap faktor lingkungan, serta strategi pemeliharaan rutin, menjadi krusial untuk efektivitas jangka panjang *cool pavement* dalam mitigasi UHI.

Kata kunci: *heat-reflective coatings*, *urban heat island*, Kondisi Aging, Berdebu, Basah, *Cool Pavement*

1 PENDAHULUAN

Fenomena *Urban Heat Island* (UHI) merupakan peningkatan suhu yang signifikan di wilayah perkotaan dibandingkan dengan daerah sekitarnya. Penyebab utama UHI adalah dominasi permukaan buatan seperti bangunan, jalan, dan trotoar yang menyerap radiasi matahari. Konsekuensinya meliputi peningkatan konsumsi energi, polusi udara, serta risiko kesehatan bagi masyarakat (Santamouris, 2013). Permasalahan ini menjadi lebih serius di kota-kota besar, di mana perkerasan jalan mencakup sekitar 30–40% dari total luas permukaan perkotaan (Wu dan Thompson, 2013), menjadikannya kontributor utama dalam akumulasi panas.

Salah satu solusi yang berkembang untuk mengatasi UHI adalah penerapan *cool pavement* atau perkerasan dingin, khususnya dengan teknologi *heat-reflective coatings*. Teknologi ini bekerja dengan meningkatkan albedo permukaan, sehingga mampu memantulkan sebagian besar sinar matahari dan mengurangi panas yang terserap. Beberapa studi menunjukkan bahwa *heat-reflective coatings* dapat menurunkan suhu permukaan hingga lebih dari 10°C dalam kondisi tertentu (Jiang dkk., 2019). Lapisan ini umumnya terdiri dari bahan polimer dengan *filler* seperti titanium dioksida (TiO₂) atau zinc oxide (ZnO), yang efektif dalam memantulkan radiasi UV dan inframerah (Miao dkk., 2022).

Namun demikian, tantangan utama dalam penerapan teknologi ini adalah durabilitasnya di berbagai kondisi permukaan perkerasan. Permukaan baru cenderung memberikan hasil adhesi yang baik, sementara permukaan yang telah menua, berdebu, atau basah menjadi lebih rentan terhadap abrasi. Faktor lingkungan dan lalu lintas mempercepat penurunan efisiensi reflektif dari lapisan ini, sehingga mengurangi performa pendinginan secara signifikan (Zheng dkk., 2020). Oleh karena itu, dibutuhkan evaluasi ketahanan material terhadap abrasi dalam kondisi nyata untuk menjamin efektivitas jangka panjang.

Salah satu metode evaluasi yang banyak digunakan adalah *Dry Track Abrasion Test*, yang dirancang untuk menilai ketahanan lapisan terhadap abrasi di bawah kondisi kering. Uji ini mengukur kehilangan material akibat gesekan dan memberikan indikasi ketahanan lapisan dalam menghadapi lalu lintas serta pengaruh lingkungan (Yi dkk., 2022). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi durabilitas *heat-reflective coatings* pada berbagai kondisi permukaan perkerasan menggunakan metode tersebut. Hasilnya diharapkan dapat memberikan data empiris mengenai performa lapisan reflektif serta rekomendasi dalam pemilihan material dan teknik aplikasi, guna mendukung pengembangan teknologi *cool pavement* yang lebih efektif dan berkelanjutan dalam mitigasi *Urban Heat Island*.

2 METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer mencakup hasil pengujian langsung terhadap sifat fisis agregat, kandungan mineral agregat, nilai uji volumetrik serta Marshall pada campuran aspal, dan kadar aspal optimum yang digunakan dalam campuran. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari pihak terkait dan terdiri dari informasi mengenai sifat fisis aspal jenis Pen 60/70. Gabungan data ini digunakan untuk menganalisis performa material dalam rangka evaluasi durabilitas *heat-reflective coatings* pada perkerasan jalan.

2.2 Urban Heat Island

Fenomena Pulau Panas Perkotaan (*Urban Heat Island/UHI*) merupakan peningkatan suhu di wilayah perkotaan dibandingkan dengan daerah pedesaan sekitarnya, yang disebabkan oleh proses urbanisasi dan aktivitas manusia seperti industrialisasi, transportasi, serta pembangunan infrastruktur yang mengubah karakteristik permukaan tanah dan meningkatkan retensi panas (Lima dkk., 2023). Identifikasi titik-titik panas UHI memerlukan pemahaman terhadap berbagai faktor, termasuk penggunaan lahan, kepadatan bangunan, dan distribusi ruang terbuka hijau, karena elemen-elemen tersebut memengaruhi distribusi suhu secara spasial. Studi berbasis citra satelit Landsat-8/9 menunjukkan bahwa perbedaan struktur penggunaan lahan dan tata letak infrastruktur hijau perkotaan memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi panas di wilayah UHI, seperti yang ditemukan pada 52 titik panas termal di Kota Shanghai (Du dkk., 2020). Di Indonesia, fenomena serupa juga terjadi di kota-kota besar, termasuk Banjarmasin, di mana suhu permukaan di pusat kota dapat mencapai 29°C hingga 30°C, jauh lebih tinggi dibandingkan daerah pinggiran yang masih memiliki tutupan vegetasi dengan suhu sekitar 18°C hingga 21°C, yang menunjukkan pentingnya peran vegetasi dalam menurunkan suhu lingkungan (Munsiy dkk., 2024).

2.3 Cool Pavement Technology

Cool pavement merupakan sebuah inovasi dalam teknologi perkerasan yang dikembangkan untuk mereduksi dampak *urban heat island* (UHI) dengan menurunkan temperatur permukaan jalan melalui peningkatan kemampuan refleksi terhadap sinar matahari (*solar reflectance*) dan/atau optimalisasi proses pendinginan melalui penguapan. Teknologi ini terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu perkerasan reflektif dan perkerasan evaporatif. Perkerasan reflektif memanfaatkan material dengan tingkat albedo yang tinggi, seperti cat khusus, agregat berwarna terang, serta bahan tambahan seperti fly ash, untuk memantulkan lebih banyak energi matahari dan mengurangi panas yang diserap (Akbari & Matthews, 2012). Sebaliknya, perkerasan evaporatif dirancang agar mampu menyimpan dan menguapkan air untuk menurunkan suhu permukaan melalui proses pelepasan panas laten, seperti yang ditemukan pada perkerasan berpori dan sistem berbasis vegetasi (Chen et al., 2019).

Berdasarkan penelitian Shimazaki et al. (2021), penggunaan *cool pavement* dalam pembangunan maupun rehabilitasi jalan terbukti efektif dalam menurunkan suhu permukaan maupun udara di sekitarnya. Penelitian oleh Anupam et al. (2022) juga menunjukkan bahwa *cool pavement* memiliki kemampuan mempertahankan suhu yang lebih rendah dibandingkan perkerasan biasa dan berperan dalam menekan akumulasi panas di wilayah perkotaan. Namun, implementasi teknologi ini masih menghadapi beberapa kendala, seperti daya tahan material, distribusi bahan tambahan yang merata, serta penurunan kinerja akibat akumulasi debu atau keausan permukaan (Zheng Wang et al., 2022).

2.4 Heat-Reflective Coatings

Pelapis pemantul panas (*Heat Reflective Coatings*) merupakan teknologi yang efektif dalam mengurangi efek *urban heat island* (UHI) melalui mekanisme pemantulan radiasi matahari, sehingga menurunkan suhu permukaan perkerasan aspal secara signifikan (Wang et al., 2022). Teknologi ini tidak hanya meningkatkan kenyamanan termal di lingkungan perkotaan, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan kerusakan pada struktur perkerasan akibat tekanan termal. Penerapan HRC berbasis resin epoksi dengan metode penyemprotan, khususnya teknik penyemprotan berulang, terbukti mampu meningkatkan daya rekat lapisan dan ketahanan terhadap abrasi. Selain itu, efisiensi aplikasi HRC dipengaruhi oleh suhu permukaan perkerasan, di mana peningkatan suhu sebesar 20 K dapat mempercepat waktu pengeringan hingga 34%, yang berimplikasi terhadap efektivitas penerapannya di lapangan. Mekanisme kerja HRC mencakup refleksi radiasi matahari oleh lapisan pelapis, yang mampu menurunkan suhu permukaan hingga 9°C, sehingga secara langsung mengurangi akumulasi panas dan meningkatkan umur layanan perkerasan aspal.

Komposisi utama HRC terdiri dari tiga komponen penting, yaitu *organic polymer*, *inorganic fillers*, dan *aggregate* (Wang dkk., 2022). Bahan pengikat HRC biasanya berbasis *organic polymer*, seperti *epoxy resin* dan *acrylic polymer*. *Epoxy resin* dikenal memiliki kekuatan mekanis tinggi dan ketahanan terhadap kelembapan serta pelarut, namun memiliki waktu dan suhu *curing* yang relatif tinggi serta kekakuan material yang menjadi tantangan dalam aplikasinya pada perkerasan. Sementara itu, *acrylic polymer* memiliki keunggulan dalam hal plastisitas dan stabilitas kimia, namun keduanya memiliki kelemahan utama yaitu rendahnya ketahanan terhadap paparan sinar ultraviolet (UV), sehingga penuaan UV menjadi isu yang harus diatasi (Wang dkk., 2022).

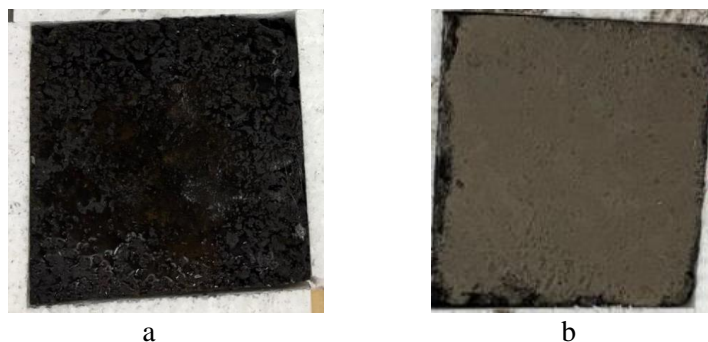
2.5 Penyiapan Sampel Lapisan Permukaan Perkerasan

Pengujian abrasi menggunakan gerinda dan sikat kawat dilakukan untuk menyimulasikan proses penuaan mekanis pada permukaan aspal. Metode ini bertujuan mengevaluasi ketahanan permukaan aspal terhadap abrasi yang diakibatkan oleh faktor eksternal seperti gesekan lalu lintas dan kondisi lingkungan yang keras. Prosedur pengujian dimulai dengan persiapan sampel aspal sesuai dengan standar pengujian, di mana kondisi awal sampel yang belum mengalami penuaan didokumentasikan sebagai data pembandingan. Selanjutnya, permukaan sampel diuji menggunakan mesin gerinda dengan cakram abrasif untuk mengikis lapisan atas, diikuti dengan penggunaan sikat kawat guna meniru efek gesekan yang terjadi pada kondisi nyata. Pengujian ini memberikan gambaran tentang daya tahan abrasi permukaan aspal dan membantu dalam menilai keawetan lapisan permukaan terhadap penuaan mekanis selama masa pemakaian jalan (Mainieri dkk., 2022).



Gambar 1 Lapisan permukaan perkerasan kondisi *aging*

Selain penuaan mekanis, kondisi lingkungan seperti keberadaan debu dan kelembapan juga memengaruhi performa lapisan permukaan perkerasan. Untuk menyimulasikan kondisi berdebu, tanah tipe lempung lanauan (*silty-clay*) yang diklasifikasikan sebagai A4 menurut klasifikasi AASHTO diaplikasikan secara merata pada permukaan HMA lama dengan laju 0,070 lb/ft² sebelum proses aplikasi *tack coat*. Sementara itu, kondisi basah disimulasikan dengan penyemprotan air secara merata pada permukaan yang sudah diberi *tack coat* dengan laju 0,06 gal/yd² sebelum pelapisan campuran HMA. Simulasi kondisi berdebu dan basah ini bertujuan untuk merepresentasikan kondisi nyata yang dialami lapisan perkerasan di lapangan, sehingga dapat dianalisis pengaruhnya terhadap daya tahan dan efektivitas lapisan permukaan terhadap berbagai faktor eksternal. (Patel dkk, 2012)



Gambar 2 a).Kondisi basah ; b).Kondisi berdebu

2.6 Pengujian Penurunan Suhu

Pengujian penurunan suhu dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas *heat reflective coatings* (HRC) dalam menurunkan suhu permukaan perkerasan aspal. Sampel aspal yang telah dilapisi HRC terlebih dahulu dipasang *thermocouple* yang kemudian dihubungkan dengan perangkat pencatat suhu digital. Tujuan dari pengujian ini adalah

untuk mengamati respons termal permukaan aspal berlapis HRC terhadap siklus pemanasan dan pendinginan yang menyerupai kondisi siang dan malam hari di lingkungan nyata. Pengujian dilakukan di dalam *heating box* yang dilengkapi dengan lampu simulasi radiasi matahari.

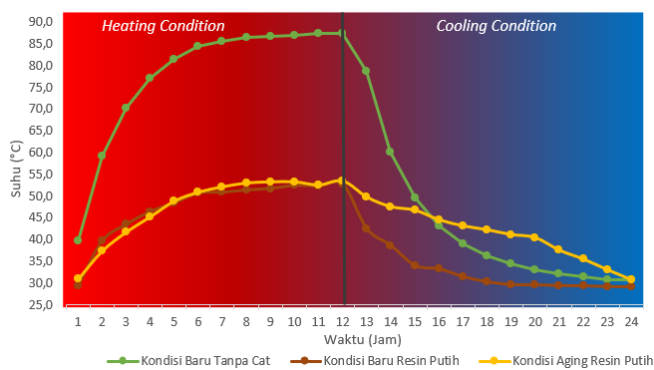
Selama proses pengujian, sampel disinari dengan intensitas cahaya sebesar 1000 W/m^2 selama 12 jam untuk menyimulasikan kondisi siang hari (fase pemanasan), kemudian dilanjutkan dengan 12 jam tanpa penyinaran untuk merepresentasikan kondisi malam hari (fase pendinginan), sehingga total durasi pengujian berlangsung selama 24 jam. Perubahan suhu yang terjadi selama periode tersebut dicatat secara kontinu untuk dianalisis. Data hasil pencatatan akan memberikan informasi penting mengenai seberapa besar pengaruh HRC dalam menurunkan suhu maksimum dan mempercepat proses pendinginan, yang menjadi indikator kinerja termal dari pelapis reflektif tersebut dalam konteks mitigasi *Urban Heat Island*.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

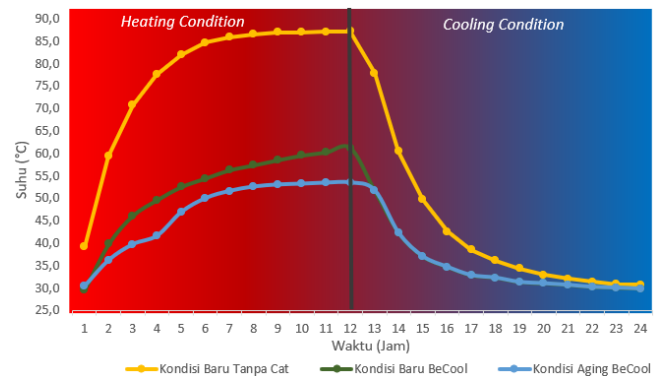
3.1 Cooling Performance

3.1.1 Lapisan Perkerasan Kondisi Aging

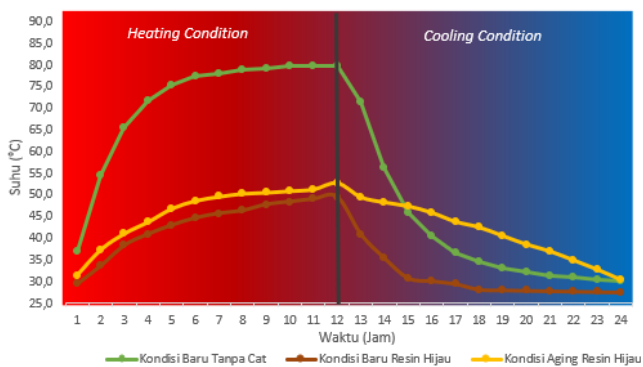
Grafik berikut ini menyajikan perbandingan performa termal dari berbagai jenis cat pemantul panas (*heat-reflective coatings*) pada kondisi pemanasan (*heating*) dan pendinginan (*cooling*), baik dalam kondisi baru maupun setelah proses penuaan (*aging*). Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas cat dalam menurunkan suhu permukaan dibandingkan dengan kondisi tanpa cat, serta mengetahui perubahan kinerjanya setelah mengalami proses penuaan buatan.



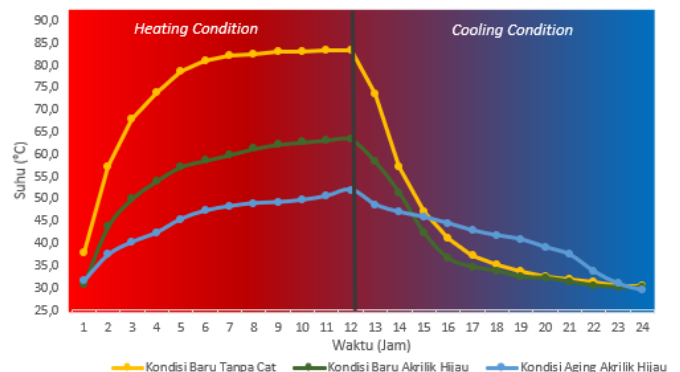
a. Kondisi Baru Tanpa Cat-Resin Putih-Aging Resin Putih



b. Kondisi Baru Tanpa Cat-BeCool-Aging Be Cool



c. Kondisi Baru Tanpa Cat-Resin Hijau-Aging Resin Hijau



d. Kondisi Baru Tanpa Cat-Akrilik Hijau-Aging Emulsi Akrilik Hijau

Gambar 3. grafik hubungan suhu-waktu kondisi baru-aging.

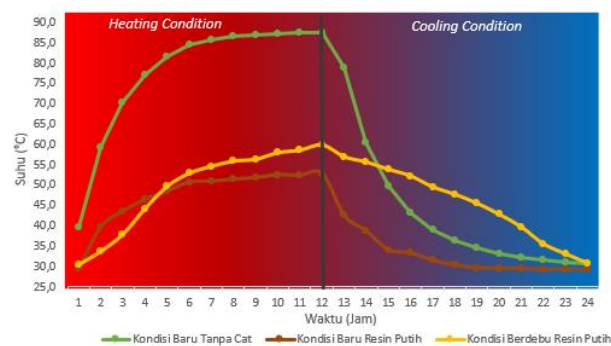
Tabel 1. Selisih suhu 12jam dan suhu 24jam kondisi baru dan *aging*.

No	Benda Uji	Suhu 12 Jam	Suhu 24 Jam	ΔT
1	Kondisi Baru tanpa Cat	84,5	30,7	53,8
2	Kondisi Baru dengan Resin Putih	52,8	29,1	23,7
	Kondisi <i>Aging</i> dengan Resin Putih	53,5	30,8	22,7
3	Kondisi Baru dengan <i>Becool</i>	61,4	29,9	31,4
	Kondisi <i>Aging</i> dengan <i>Becool</i>	53,3	29,9	23,6
4	Kondisi Baru dengan Resin Hijau	49,4	27,5	22,0
	Kondisi <i>Aging</i> dengan Resin Hijau	52,8	30,3	22,6
5	Kondisi Baru dengan Emulsi Akrilik Hijau	63,3	30,0	33,3
	Kondisi <i>Aging</i> dengan Emulsi Akrilik Hijau	51,9	29,5	22,5

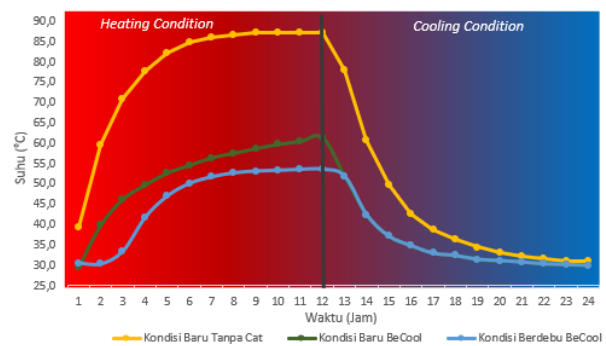
Berdasarkan analisis dari data grafik dan tabel, terlihat sebuah narasi performa yang kontras antara kondisi cat saat baru dan setelah mengalami proses *aging*. Pada fase pemanasan awal, semua lapisan cat baru menunjukkan keunggulan yang signifikan dalam menahan panas jika dibandingkan dengan permukaan kontrol tanpa cat, yang mana pada grafik garisnya menjulang tinggi dan tabel mengonfirmasi suhu puncaknya mencapai 84,5°C. Emulsi akrilik hijau dan *becool* tampil sebagai yang paling baik, dengan kurva pemanasan terendah pada grafik dan suhu puncak yang tercatat hanya 63,3°C dan 61,4°C, membuktikan kemampuan reflektifitas panas yang sangat efektif. Akan tetapi, keunggulan awal ini berbanding terbalik dengan temuan pada fase pendinginan, di mana dampak penuaan menjadi sangat jelas. Kemampuan cat untuk melepaskan panas—yang diukur sebagai ΔT —menurun secara drastis setelah menua. Hal ini secara visual tampak pada kurva pendinginan yang lebih landai dan secara numerik terbukti pada nilai ΔT "emulsi akrilik hijau" yang anjlok dari 33,3 menjadi 22,5, serta "*becool*" yang jatuh dari 31,4 menjadi 23,6. Penurunan performa yang signifikan ini mengindikasikan bahwa proses penuaan telah merusak kemampuan material, sehingga efektivitas jangka panjangnya sebagai pendingin pasif menjadi berkurang.

3.1.2 Lapisan Perkerasan Kondisi Berdebu

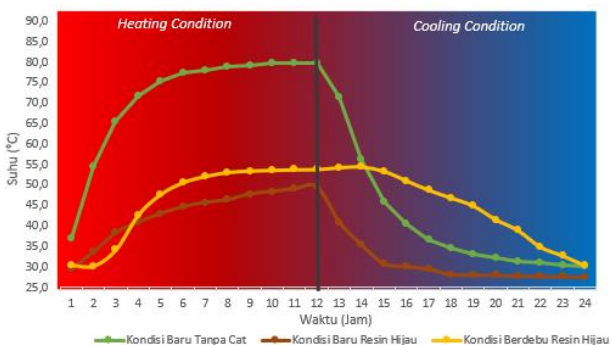
Grafik berikut menyajikan hasil pengujian suhu permukaan terhadap empat jenis cat pemantul panas (*heat-reflective coatings*) pada dua kondisi utama: kondisi baru, dan kondisi berdebu. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi dampak kontaminasi permukaan oleh debu terhadap kemampuan cat dalam memantulkan panas.



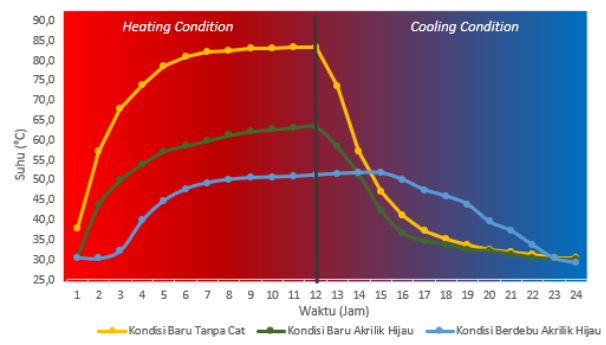
a. Kondisi Baru Tanpa Cat-Resin Putih-Berdebu Resin Putih



b. Kondisi Baru Tanpa Cat-BeCool Putih-Berdebu Resin Putih



c. Kondisi Baru Tanpa Cat-Resin Hijau-Berdebu Resin Hijau



d. Kondisi Baru Tanpa Cat-Akrilik Hijau-Berdebu Emulsi Akrilik Hijau

Gambar 4 Grafik hubungan suhu-waktu kondisi baru-berdebu

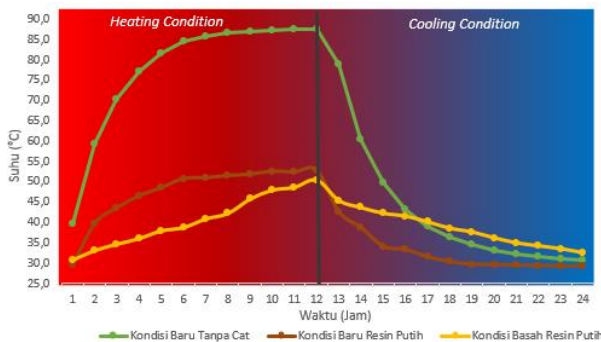
Tabel 2. Selisih suhu 12jam dan suhu 24jam kondisi baru dan berdebu.

No`	Benda Uji	Suhu 12 Jam	Suhu 24 Jam	ΔT
1	Kondisi Baru tanpa Cat	84,5	30,7	53,8
2	Kondisi Baru dengan Resin Putih	52,8	29,1	23,7
	Kondisi Berdebu dengan Resin Putih	59,8	30,8	29,0
3	Kondisi Baru dengan <i>Becool</i>	61,4	29,9	31,4
	Kondisi Berdebu dengan <i>Becool</i>	53,6	29,9	23,6
4	Kondisi Baru dengan Resin Hijau	49,4	27,5	22,0
	Kondisi Berdebu dengan Resin Hijau	53,7	30,3	23,5
5	Kondisi Baru dengan Emulsi Akrilik Hijau	63,3	30,0	33,3
	Kondisi <i>Aging</i> dengan Emulsi Akrilik Hijau	51,1	29,3	21,9

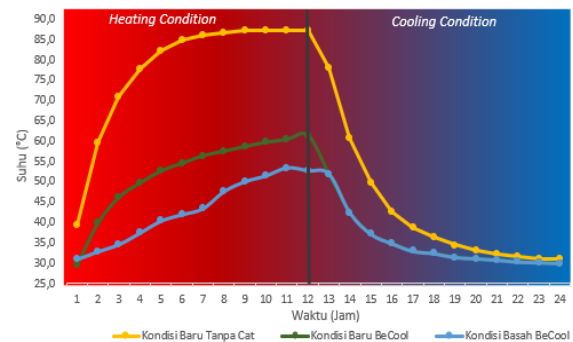
Analisis data grafik dan tabel menunjukkan dampak kompleks dari lapisan debu pada performa cat penolak panas. Umumnya, debu meningkatkan suhu permukaan, seperti terlihat jelas pada grafik untuk resin putih dan resin hijau di mana kondisi berdebu secara visual lebih tinggi dari kondisi baru, dengan tabel mengonfirmasi kenaikan suhu puncak pada resin putih dari 52,8°C menjadi 59,8°C. Akan tapi, terjadi perbedaan yang sangat menarik pada cat *becool* yang permukaannya justru menjadi lebih sejuk saat berdebu dengan suhu puncak turun dari 61,4°C menjadi 53,6°C. Selain memengaruhi suhu puncak, debu juga mengubah kemampuan pendinginan meskipun *becool* lebih sejuk, kurva pendinginannya yang lebih landai pada grafik dan penurunan nilai selisihnya dari 31,4 menjadi 23,6 menunjukkan performa pendinginannya justru menurun. Hal ini membuktikan bahwa dampak debu tidak seragam dan sangat bergantung pada jenis formulasi cat.

3.1.3 Lapisan Perkerasan Kondisi Basah

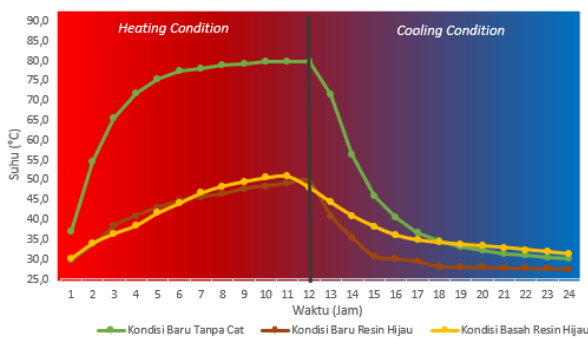
Grafik berikut menggambarkan pengaruh kondisi basah terhadap performa termal dari berbagai jenis cat pemantul panas (*heat-reflective coatings*). Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi bagaimana keberadaan air atau kelembapan di permukaan cat memengaruhi kemampuannya dalam menahan panas dan melepaskan panas kembali.



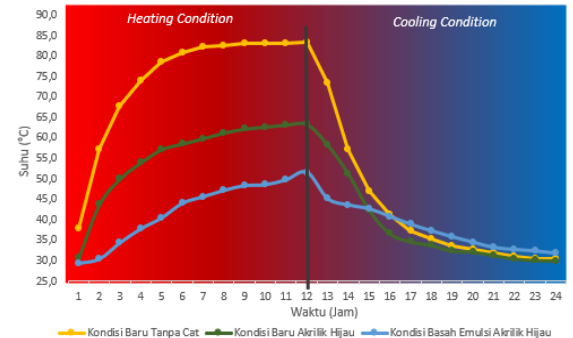
(a) Kondisi Baru Tanpa Cat-Resin Putih-Basah Resin Putih



(b) Kondisi Baru Tanpa Cat-BeCool Putih-Basah Resin Putih



(c) Kondisi Baru Tanpa Cat-Resin Hijau-Basah Resin Hijau



(d) Kondisi Baru Tanpa Cat-Akrilik Hijau-Basah Emulsi Akrilik Hijau

Gambar 5. Grafik hubungan suhu-waktu kondisi baru-basah.

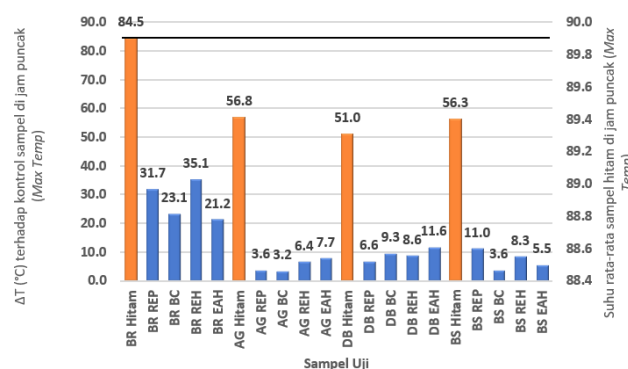
Tabel 3. Selisih suhu 12 jam dan suhu 24 jam kondisi baru dan basah.

No	Benda Uji	Suhu 12 Jam	Suhu 24 Jam	ΔT
1	Kondisi Baru tanpa Cat	84,5	30,7	53,8
2	Kondisi Baru dengan Resin Putih	52,8	29,1	23,7
	Kondisi Basah dengan Resin Putih	50,4	32,5	17,9
3	Kondisi Baru dengan <i>Becool</i>	61,4	29,9	31,4
	Kondisi Basah dengan <i>Becool</i>	52,7	29,9	22,8
4	Kondisi Baru dengan Resin Hijau	49,4	27,5	22,0
	Kondisi Basah dengan Resin Hijau	48,0	31,2	16,9
5	Kondisi Baru dengan Emulsi Akrilik Hijau	63,3	30,0	33,3
	Kondisi Basah dengan Emulsi Akrilik Hijau	51,6	31,8	19,8

Analisis data secara spesifik mengungkap dampak ganda dari kondisi basah pada performa cat penolak panas: peningkatan drastis dalam menahan panas diimbangi oleh perubahan profil pendinginan. Selama fase pemanasan, efek pendinginan evaporatif secara konsisten membuat kurva suhu kondisi basah berada di bawah kondisi kering, terbukti pada emulsi akrilik hijau yang suhunya berhasil ditekan sebesar $11,7^{\circ}\text{C}$ (dari $63,3^{\circ}\text{C}$ ke $51,6^{\circ}\text{C}$) dan pada *becool* yang turun $8,7^{\circ}\text{C}$ (dari $61,4^{\circ}\text{C}$ ke $52,7^{\circ}\text{C}$). Akan tetapi, keuntungan ini secara langsung menyebabkan *trade-off* pada fase pendinginan, di mana total kapasitas pendinginan (ΔT) menurun sebagai konsekuensi matematis dari suhu puncak yang sudah lebih rendah. Secara terukur, ΔT pada emulsi akrilik hijau anjlok sebesar 13,5 poin (dari 33,3 ke 19,8), sementara pada *becool* tereduksi sebesar 8,6 poin (dari 31,4 ke 22,8).

3.1.4 Rekapitulasi Perubahan Suhu Terhadap Kontrol Sampel di Jam Puncak

Grafik di bawah ini menyajikan data hasil pengujian termal yang membandingkan performa sejumlah sampel uji. Sumbu vertikal pada grafik ini merepresentasikan nilai selisih temperatur maksimum (ΔT) dari sampel BR Hitam (kondisi baru tanpa *coating*) terhadap sebuah sampel kontrol BR REP (kondisi baru dengan resin epoksi putih), BR BC (kondisi baru dengan *becool*), BR REH (kondisi baru dengan resin epoksi hijau), BR EAH (kondisi baru emulsi akrilik hijau), AG Hitam (kondisi *aging* tanpa *coating*), AG REP (kondisi *aging* dengan resin epoksi putih), AG BC (kondisi *aging* dengan *becool*), AG REH (kondisi *aging* dengan resin epoksi hijau), AG EAH (kondisi *aging* dengan emulsi akrilik hijau), DB Hitam (kondisi berdebu tanpa *coating*), DB REP (kondisi berdebu dengan resin epoksi putih), DB BC (kondisi berdebu dengan *becool*), DB REH (kondisi berdebu dengan resin epoksi hijau), DB EAH (kondisi berdebu dengan emulsi akrilik hijau), BS Hitam (kondisi basah tanpa *coating*), BS REP (kondisi basah dengan resin epoksi putih), BS BC (kondisi basah dengan *becool*), BS REH (kondisi basah dengan resin epoksi hijau), BS EAH (kondisi basah dengan emulsi akrilik hijau) yang diukur pada kondisi suhu puncak. Pada sumbu horizontal, dijabarkan beragam sampel yang diuji, yang telah dikelompokkan berdasarkan kategori dan jenis perlakuan tertentu. Secara keseluruhan, grafik ini bertujuan untuk memberikan gambaran visual komparatif mengenai efektivitas termal masing-masing sampel sebelum dianalisis lebih lanjut pada bagian pembahasan. Berikut adalah grafik rekapitulasi perubahan suhu terhadap kontrol sampel di jam puncak yang dapat dilihat pada Gambar 6.



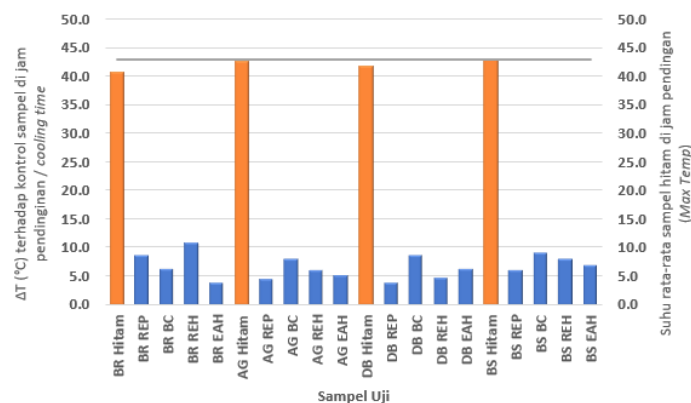
Gambar 6. Rekapitulasi perubahan suhu terhadap kontrol sampel di jam puncak

Dengan asumsi bahwa data BR Hitam merupakan suhu acuan tertinggi yang tercapai yaitu $84,5^{\circ}\text{C}$, dan nilai pada batang lainnya adalah selisih suhu (ΔT) yang menunjukkan seberapa lebih dinginnya sampel tersebut dari acuan, maka analisis performa termal menjadi terbalik. Dalam kerangka ini, sampel dengan nilai ΔT terbesar adalah yang paling efektif menahan panas. Terlihat bahwa sampel AG Hitam ($\Delta T=56,8^{\circ}\text{C}$), BS REP ($\Delta T=56,3^{\circ}\text{C}$), dan DB REP ($\Delta T=51,0^{\circ}\text{C}$) menunjukkan performa terbaik karena berhasil mencapai suhu yang jauh lebih rendah dari acuan.

Sebaliknya, sampel dengan ΔT terkecil seperti AG BC ($3,2^{\circ}\text{C}$), AG REP ($3,6^{\circ}\text{C}$), dan BS BC ($3,6^{\circ}\text{C}$) merupakan yang paling tidak efektif, karena suhunya hanya sedikit lebih rendah dan hampir menyamai suhu panas dari acuan BR Hitam. Hal ini mengindikasikan bahwa jenis perlakuan pada sampel (seperti REP, BC, EAH) memberikan dampak yang sangat bervariasi dan krusial terhadap kemampuan mitigasi panasnya.

3.1.5 Rekapitulasi Perubahan Suhu Terhadap Kontrol Sampel di Jam Pendinginan

Grafik di bawah ini menyajikan data hasil pengujian termal yang membandingkan performa sejumlah sampel uji. Sumbu vertikal pada grafik ini merepresentasikan nilai selisih temperatur maksimum (ΔT) dari sampel BR Hitam (kondisi baru tanpa *coating*) terhadap sebuah sampel kontrol BR REP (kondisi baru dengan resin epoksi putih), BR BC (kondisi baru dengan *becool*), BR REH (kondisi baru dengan resin epoksi hijau), BR EAH (kondisi baru emulsi akrilik hijau), AG Hitam (kondisi *aging* tanpa *coating*), AG REP (kondisi *aging* dengan resin epoksi putih), AG BC (kondisi *aging* dengan *becool*), AG REH (kondisi *aging* dengan resin epoksi hijau), AG EAH (kondisi *aging* dengan emulsi akrilik hijau), DB Hitam (kondisi berdebu tanpa *coating*), DB REP (kondisi berdebu dengan resin epoksi putih), DB BC (kondisi berdebu dengan *becool*), DB REH (kondisi berdebu dengan resin epoksi hijau), DB EAH (kondisi berdebu dengan emulsi akrilik hijau), BS Hitam (kondisi basah tanpa *coating*), BS REP (kondisi basah dengan resin epoksi putih), BS BC (kondisi basah dengan *becool*), BS REH (kondisi basah dengan resin epoksi hijau), BS EAH (kondisi basah dengan emulsi akrilik hijau) yang diukur pada kondisi suhu pendinginan. Pada sumbu horizontal, dijabarkan beragam sampel yang diuji, yang telah dikelompokkan berdasarkan kategori dan jenis perlakuan tertentu. Secara keseluruhan, grafik ini bertujuan untuk memberikan gambaran visual komparatif mengenai efektivitas termal masing-masing sampel sebelum dianalisis lebih lanjut pada bagian pembahasan. Berikut adalah grafik rekapitulasi perubahan suhu terhadap kontrol sampel di jam pendinginan yang dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Rekapitulasi perubahan suhu terhadap kontrol sampel di jam pendinginan

Berdasarkan Gambar 7, dapat di analisis performa pendinginan menunjukkan bahwa sampel-sampel yang memiliki kemampuan pendinginan terbaik, ditandai dengan nilai ΔT (penurunan suhu) yang tertinggi, adalah BR REH, AG BC, DB BC, dan BS BC. Keempat sampel ini terbukti paling efektif dan baik dalam melepaskan panas selama periode waktu yang ditentukan. Sebaliknya, sampel-sampel lainnya, termasuk yang secara visual pada grafik tampak memiliki batang yang sangat tinggi, pada kenyataannya memiliki nilai ΔT yang lebih rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa kelompok sampel tersebut secara signifikan kurang efisien dalam proses pendinginan jika dibandingkan dengan empat sampel yang telah disebutkan.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, semua material *heat-reflective coatings* (HRC) terbukti efektif dalam menurunkan suhu perkerasan aspal dibandingkan dengan permukaan tanpa pelapis. Kinerja *Heat Reflective Coating* (HRC) sangat tergantung pada kondisi permukaannya. Kondisi penuaan (*aging*) dan berdebu biasanya menurunkan efisiensi reflektif HRC. Namun menariknya, material *becool* dan emulsi akrilik hijau justru menunjukkan peningkatan efisiensi di bawah kondisi tersebut. Sebaliknya, kondisi basah secara konsisten meningkatkan kinerja pendinginan semua material pelapis, kemungkinan besar karena adanya efek pendinginan evaporatif. Analisis lebih lanjut pada fase pelepasan panas menunjukkan bahwa material *Becool* pada kondisi *aging*, berdebu, dan basah termasuk yang paling efektif. Berdasarkan penelitian di atas dapat disimpulkan bahwa, pemilihan material HRC yang tahan terhadap faktor lingkungan, serta strategi pemeliharaan rutin, menjadi krusial untuk efektivitas jangka panjang *cool pavement* dalam mitigasi *urban heat island* (UHI).

REFERENSI

- Chen, J., Wu, Q., Wang, H., Quan, Z., and Dan, H. (2024). "Modeling and analysis of ice condensation on bridge deck pavement surface based on heat transfer theory and finite element method. *Applied Thermal Engineering*"
- Damarsasi Nugroho, R., Rahman, T., dan Utomo, S., (2024). *Pengaruh Muatan Elektrik Permukaan Tack Coat dan Agregat Terhadap Kuat Geser Antarlapisan Campuran Aspal*.
- Rahman, T., Zudhy Irawan, M., Noor Tajudin, A., Amrozi, R., Widyatmoko, I., (2023). "Knowledge mapping of cool pavement technologies for urban heat island Mitigation: A Systematic bibliometric analysis." *Energy Build.*
- Rahman, T., Suhendri, Tajudin, A.N., Suwanto, F., Sudigdo, P., and Thom, N., (2024). "Durability evaluation of heat-reflective coatings for road surfaces: A systematic review". *Sustain Cities Soc.*
- Li, Y., Si, Y., Zhang, K., and Zhu, Y. (2025). "Investigation of interface mechanics and crack propagation in warm-mixed rubber asphalt mixture under salt-freeze-thaw conditions. *Construction and Building Materials*".
- Li, Z., Zhang, X., Yan, L., Du, H., Guo, A., Mu, Y., and Liu, J. (2024). "High reflectivity and high emissivity integrated double layer coating on the flexible alumina fiber fabric with enhanced heat-dissipation efficiency". *Ceramics International*, 50(16).
- Lima, O., Freitas, E., Cardoso, P., Segundo, I. R., Margalho, É., Moreira, L., José, J. H., Landi, S., and Carneiro, J. (2023). "Mitigation of Urban Heat Island Effects by Thermochromic Asphalt Pavement. *Coatings*", 13(1).
- Liu, B., He, J., Huang, K., Feng, S., Wang, Z., Wu, X., and Huang, B. (2024). "Organic expanded vermiculite as an alternative to filler for improving aging resistance of asphalt mixture". *Case Studies in Construction Materials*.
- Luo, L., Yang, S. H., Oeser, M., and Liu, P. (2024). "Moisture damage mechanism of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement binder: A novel molecular dynamics study". *Journal of Cleaner Production*, 475.
- Mainieri, J. J. G., Sen, S., Roesler, J., and Al-Qadi, I. L. (2022). "Albedo Change Mechanism of Asphalt Concrete Surfaces". In *Transportation Research Record* (Vol. 2676, Issue 7, pp. 763–772). SAGE Publications Ltd.
- Munsiy, Nugroho, A., Jauhari, A., dan Faisal, M. R. (2024). "Urban Heat Island Spatial Model for Climate Village Program Planning". *Journal of Applied Data Sciences*, 5(2), 546–558.
- Shamsaei, M., Carter, A., and Vaillancourt, M. (2022). "A review on the heat transfer in asphalt pavements and urban heat island mitigation methods". In *Construction and Building Materials* (Vol. 359). Elsevier Ltd.
- Song, W., Chen, D., Wu, H., Wu, Z., Wada, S. A., and Yuan, H. (2024). "Preparation and performance characterization of waterborne epoxy resin modified asphalt emulsion for tack coat". *Journal of Cleaner Production*, 475.
- Wang, Z., Xie, Y., Mu, M., Feng, L., Xie, N., and Cui, N. (2022). "Materials to mitigate the urban heat island effect for cool pavement": a brief review. *Buildings*, 12(8), 1221.
- Zheng, M., Han, L., Wang, F., Mi, H., Li, Y., and He, L. (2015). "Comparison and analysis on heat reflective coating for asphalt pavement based on cooling effect and anti-skid performance". *Construction and Building Materials*.
- Alhaqi, D.H., Nazalanilni, A., Rahman, T., (2024). "Evaluation of the cooling performance of various heat-reflective cool pavement coatings for Urban Heat Island mitigation".