

Evaluasi Performa Termal Perkerasan Aspal Berlapis *Heat-Reflective Coating* Pada Berbagai Tipe Gradasi Campuran Beraspal

Nindya Adha Kurnia Diningrum¹, Taqia Rahman^{1*}, Latif Budi Suparma¹

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

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

INTISARI

Fenomena *Urban Heat Island* (UHI), yang disebabkan oleh penyerapan panas aspal konvensional, memerlukan solusi inovatif. Penelitian ini mengevaluasi efektivitas berbagai *heat-reflective coatings* (HRC) di iklim tropis Indonesia untuk menurunkan suhu permukaan aspal dan meningkatkan efisiensi termal. Penelitian ini mensimulasikan siklus pemanasan dan pendinginan 12 jam, menguji tiga gradasi aspal: *Dense Graded* (DG), *Open Graded* (OG), dan *Gap Graded* (GG). Setiap gradasi diaplikasikan dengan HRC berbeda, yaitu Resin Epoksi Putih (REP), BeCool (BC), Resin Epoksi Hijau (REH), dan Emulsi Akrilik Hijau (EAH). Hasilnya menunjukkan HRC sangat efektif mengurangi suhu. Resin Epoksi Hijau (DG REH) pada *Dense Graded* menjadi yang paling unggul, mencapai suhu puncak terendah 49,4°C dan suhu akhir terdingin 27,5°C. Keunggulan ini berkat kombinasi pigmen Titanium Dioksida dan Iron Oxide yang memantulkan radiasi inframerah dekat. Dalam fase suhu puncak, DG REH paling efektif menekan kenaikan suhu pada *Dense Graded*, dengan penurunan suhu puncak 35,1°C. Resin Epoksi Putih efektif pada *Open Graded* (21,6°C) dan *Gap Graded* (17,3°C). Dalam fase pendinginan, DG REH kembali unggul pada *Dense Graded* (10,6°C), sementara OG REP terbaik pada *Open Graded* (5,4°C), dan GG REP memimpin pada *Gap Graded* (2,6°C). Ini menegaskan DG REH sebagai material HRC paling efektif dalam melepaskan panas, mendukung upaya kota berkelanjutan.

Kata kunci: *Cool pavement*, *Heat-reflective coating*, suhu permukaan aspal, gradasi campuran beraspal, termal.

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan suhu di area perkotaan, yang dikenal sebagai *Urban Heat Island* (UHI), disebabkan oleh perbedaan karakteristik permukaan antara daerah perkotaan dan pedesaan. Keberadaan bangunan, jalan, aktivitas manusia dan infrastruktur lainnya berkontribusi pada penyerapan dan penahanan panas (Kim dkk., 2024). Perubahan dalam struktur perkotaan, seperti peningkatan jumlah bangunan dan penggunaan aspal atau beton, memengaruhi radiasi matahari dan meningkatkan suhu udara, sehingga memperburuk efek UHI (Cichowicz dan Bochenek, 2024).

Salah satu solusi untuk mengurangi efek *Urban Heat Island* (UHI) adalah mengganti aspal konvensional dengan perkerasan berwarna atau reflektif yang dapat menurunkan suhu permukaan, meningkatkan keselamatan, dan mendukung pembangunan kota berkelanjutan (Riaz dkk., 2024). Perkerasan reflektif, seperti *heat-reflective coatings* yang terbuat dari bahan pembentuk film dan pengisi tahan panas, dirancang untuk meningkatkan pantulan cahaya dan mengurangi penyerapan panas (Yu dkk., 2023). Kemampuan material ini dalam membelokkan radiasi matahari berkontribusi pada penurunan suhu udara di sekitarnya, di mana tingkat reflektifitas matahari yang lebih tinggi berkorelasi dengan suhu permukaan yang lebih rendah karena energi yang diserap lebih sedikit (Yang dkk., 2015).

Meskipun peningkatan albedo efektif menurunkan suhu permukaan, daya tahan jangka panjang dari perkerasan dingin masih menjadi perhatian, terutama karena pengaruh abrasi, penuaan, dan kondisi lingkungan (García Mainieri dkk., 2022). Keberhasilan *heat-reflective coatings* juga dipengaruhi oleh tipe agregat dalam campuran HMA, seperti gradasi padat, terbuka, dan celah, yang masing-masing memiliki keunggulan dalam menurunkan suhu dan meningkatkan ketahanan terhadap kondisi lingkungan (Thushara dan Murali Krishnan, 2020).

Bahan pelapis seperti resin epoksi, emulsi akrilik, dan cat BeCool digunakan untuk meningkatkan reflektansi panas. Resin epoksi dipilih karena kekuatan rekat dan ketahanannya, sedangkan *filler* anorganik seperti TiO₂ digunakan untuk meningkatkan pantulan cahaya, mampu menurunkan suhu permukaan hingga 20,19°C (Alhaqi dkk., 2024). Emulsi akrilik juga menunjukkan kinerja termal baik dengan penurunan suhu hingga 12°C, meski dapat terpengaruh oleh pelapukan dan kotoran permukaan (Synnefa dkk., 2006). Cat BeCool, dengan nilai SRI tinggi dan reflektansi sinar matahari sebesar 0,77, biasanya digunakan pada atap namun dalam penelitian ini diaplikasikan pada perkerasan jalan untuk mengurangi efek UHI. Inovasi ini diharapkan efektif menurunkan suhu aspal di iklim tropis seperti

Indonesia serta mendukung pengendalian pemanasan global melalui efisiensi reflektansi. Dalam konteks ini, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas berbagai jenis *heat-reflective coatings*, seperti resin epoksi, emulsi akrilik, dan cat BeCool, dalam menurunkan suhu permukaan perkerasan serta meningkatkan efisiensi termal di lingkungan perkotaan. Dengan mengkaji pengaruh karakteristik material, komposisi filler, serta jenis gradasi agregat terhadap performa pendinginan, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap strategi mitigasi UHI yang lebih efektif, khususnya di iklim tropis seperti Indonesia, serta mendukung upaya pengembangan infrastruktur kota yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

2 METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh secara langsung dari penelitian ini, yaitu berupa hasil pengujian di laboratorium. Data primer yang akan diteliti pada penelitian ini *cooling performance*, dan jenis gradasi *Hot Mix Asphalt* (HMA) pada berbagai jenis *heat-reflective coatings* (HRC) dan data tipe *dense graded* (hasil KAO, uji marshall, rasio VCA_{MIX}/VCA_{DRC} dan *drain down*. Data sekunder mencakup data sifat fisis agregat, data tipe *dense graded* (hasil KAO, uji marshall, dan uji volumetrik) dan data tipe *open graded* (hasil KAO, uji marshall, uji *cantabro loss*, uji *british pendulum*).

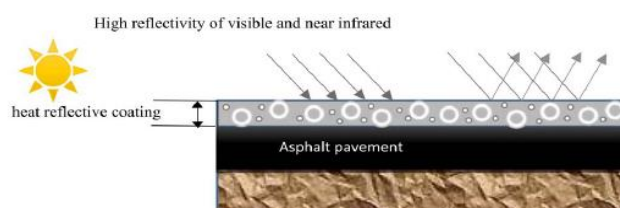
2.2 Cool Pavement Technology

Salah satu pendekatan paling umum dalam teknologi perkerasan dingin adalah penggunaan perkerasan reflektif, yang bekerja dengan meningkatkan reflektansi permukaan jalan sehingga panas matahari tidak mudah terserap. Dengan demikian, suhu permukaan jalan dapat ditekan secara signifikan, yang pada gilirannya membantu menurunkan suhu udara sekitar dan mengurangi efek *urban heat island* (UHI) (Rahman dkk., 2023). Namun demikian, efektivitas pendinginan dari pelapis reflektif ini cenderung menurun seiring waktu akibat abrasi, penuaan material, dan paparan sinar ultraviolet. Berdasarkan studi eksperimental, pelapisan ini dapat mengalami penurunan performa pendinginan sebesar 13–53% setelah mengalami pelapukan dan abrasi, serta penurunan reflektansi hingga 50% dalam satu tahun penggunaan (Rahman dkk., 2024).

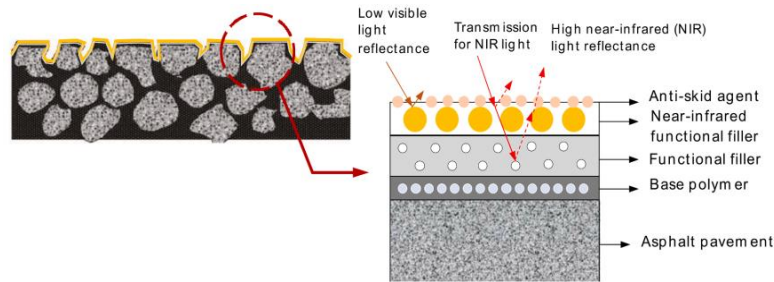
Perkerasan reflektif dipandang sebagai alternatif inovatif terhadap perkerasan tradisional berwarna gelap, karena memiliki warna terang dan albedo tinggi yang mampu mengurangi penyerapan serta pancaran ulang panas dari permukaan (Akbari dan Matthews, 2012). Dalam penelitian eksperimental terbaru, 22 formulasi pelapis panas-reflektif berbasis emulsi akrilik dan resin epoksi diuji untuk menilai kemampuan pendinginannya. Hasil menunjukkan bahwa teknologi ini mampu menurunkan suhu permukaan aspal hingga 20°C pada siang maupun malam hari. Masing-masing jenis pelapis memiliki karakteristik berbeda: pelapis berbasis air memiliki daya cengkeram tinggi tetapi mudah retak, sementara pelapis epoksi lebih awet namun lebih licin, sehingga membutuhkan tambahan antiselip. Penggunaan SiO_2 terbukti efektif mempertahankan efek pendinginan dan mengurangi kilap pada pelapis epoksi, tetapi justru menurunkan performa pendinginan jika digunakan pada pelapis akrilik, yang secara alami sudah memiliki tampilan matte (Alhaqi dkk., 2024).

Secara prinsip, pelapis reflektif bekerja dengan memantulkan sebagian besar radiasi matahari, baik dari spektrum cahaya tampak maupun inframerah. Hal ini membantu meminimalkan penyerapan energi oleh aspal dan mengurangi pelepasan panas ke lingkungan sekitar. Dengan mengurangi beban panas yang diterima oleh permukaan jalan, pelapis ini secara langsung berkontribusi pada peningkatan kenyamanan termal di lingkungan perkotaan, menjadikannya salah satu strategi penting dalam mitigasi UHI (Chen dkk., 2022).

Pada Gambar 1. menunjukkan prinsip kerja pelapis pemantul panas yang mencerminkan cahaya tampak dan inframerah dari sinar matahari. Sedangkan Gambar 2. menggambarkan skema pelapis perkerasan dengan kemampuan reflektif tinggi, yang berperan penting dalam menjaga stabilitas kinerja optik selama masa pakai.



Gambar 1. Prinsip kerja pelapis pemantul panas (Chen dkk., 2022).



Gambar 2. Skema pelapis perkerasan jalan yang sangat reflektif terhadap panas (Jiang dkk., 2019).

Komposisi material pelapis menjadi faktor penentu dalam efektivitas pendinginan jangka panjang. Pelapis umumnya terdiri dari polimer organik sebagai bahan pengikat, pengisi anorganik untuk meningkatkan reflektansi dan mengurangi konduktivitas termal, serta agregat kasar yang menjaga kekasaran permukaan agar tidak licin. Resin epoksi menawarkan daya tahan mekanis dan kimia yang tinggi, tetapi kurang fleksibel dan cenderung lambat mengering. Sebaliknya, polimer akrilik lebih fleksibel namun rentan terhadap degradasi sinar UV. Pengisi seperti TiO_2 , SiO_2 , ZnO , dan Al_2O_3 ditambahkan untuk meningkatkan reflektansi, meski dapat menimbulkan efek silau. Oleh karena itu, pigmen seperti besi oksida digunakan untuk mengurangi silau tanpa mengorbankan kemampuan pantul. Agregat seperti pasir silika dan porselen juga digunakan untuk menjaga tekstur permukaan dan mengurangi risiko selip akibat pelapisan yang terlalu halus (Jiang dkk., 2019).

2.3 Pengujian Suhu

Pengujian suhu dilakukan menggunakan simulasi pendinginan dengan memanfaatkan sebuah kotak pemanas yang dilengkapi lampu 1000 W/m^2 untuk mensimulasikan panas matahari. Pengujian berlangsung selama 24 jam, terdiri dari 12 jam lampu menyala (kondisi pemanasan) dan 12 jam lampu mati (kondisi pendinginan) untuk mensimulasikan kondisi siang dan malam. *Thermocouple* dipasang pada sampel aspal dan terhubung ke alat pencatat suhu untuk merekam perubahan suhu selama pengujian. Data suhu kemudian dikumpulkan dan dianalisis untuk melihat variasi suhu pada setiap sampel (Alhaqi dkk., 2024). Hasil pengujian menunjukkan bahwa aplikasi 11 campuran *waterborne heat-reflective coating* (HRC) pada sampel aspal mampu menurunkan suhu permukaan aspal secara signifikan. Data perubahan suhu direkam setiap menit selama 24 jam dan dirata-ratakan dari dua sampel untuk setiap campuran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *coating* HRC berbasis air (*acrylic emulsion*) dan berbasis minyak (*epoxy resin*) dapat mengurangi suhu permukaan aspal hingga maksimal 20°C , serta mempertahankan efek pendinginan selama simulasi malam hari (Alhaqi dkk., 2024).



(a) Heating Box



(b) Alat Perekam Suhu (*Thermocouple*)

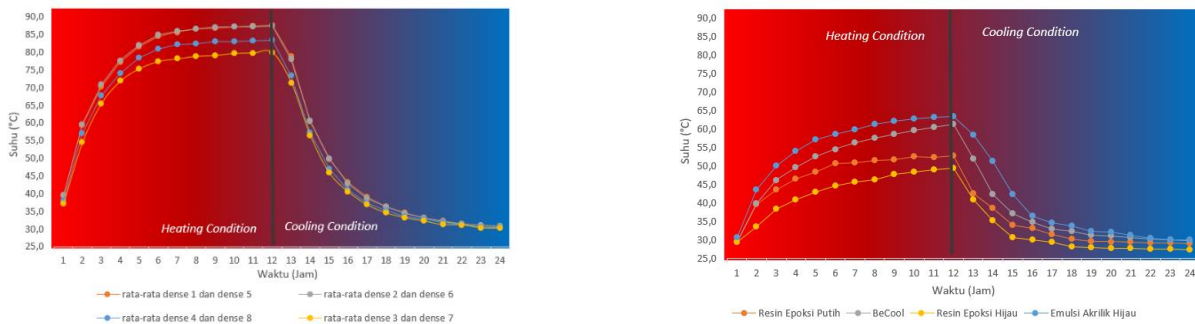
Gambar 3. Pengujian suhu.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perbandingan antara *Cooling Performance Dense Graded* tanpa HRC dan *Cooling Performance Dense Graded* dengan HRC

Analisis terhadap Gambar 4 yang memvisualisasikan suhu rata-rata terhadap waktu, didukung oleh data numerik pada Tabel 1 dan Tabel 2, secara menyeluruh menguraikan perbedaan signifikan dalam kinerja pendinginan antara perkerasan *dense graded* tanpa dan dengan aplikasi *Heat Reflective Coating* (HRC). Pada fase pemanasan (*Heating*

Condition) dari jam 0 hingga jam 12, terlihat jelas bahwa sampel *dense graded* tanpa HRC mengalami peningkatan suhu yang drastis, mencapai puncak antara 79,9°C hingga 87,5°C pada jam 12 (Tabel 1). Sebaliknya, sampel *dense graded* yang telah diaplikasikan HRC menunjukkan suhu puncak yang jauh lebih rendah, berkisar antara 49,4°C hingga 63,3°C (Tabel 2). Perbedaan yang cukup drastis pada suhu puncak ini merupakan bukti kuat efektivitas HRC sebagai lapisan reflektif yang berhasil memantulkan sebagian besar radiasi matahari, sehingga meminimalkan penyerapan panas dan mencegah penyimpanan suhu yang ekstrem pada permukaan aspal sejak awal.



(a) suhu rata-rata setiap sampel *dense graded* tanpa HRC dalam kondisi *heating* dan *cooling*

(b) suhu rata-rata setiap sampel *dense graded* dengan HRC dalam kondisi *heating* dan *cooling*

Gambar 4. Perbandingan *cooling performance* *dense graded* tanpa HRC dan *dense graded* dengan HRC.

Tabel 1. Penurunan suhu *dense graded* tanpa HRC.

Dense tanpa HRC	Suhu jam 12	Suhu jam 24	ΔT
Dense 1 dan Dense 5	87,5	30,7	56,8
Dense 2 dan Dense 6	87,3	30,8	56,4
Dense 3 dan Dense 7	79,9	30,2	49,7
Dense 4 dan Dense 8	83,3	30,4	53,0

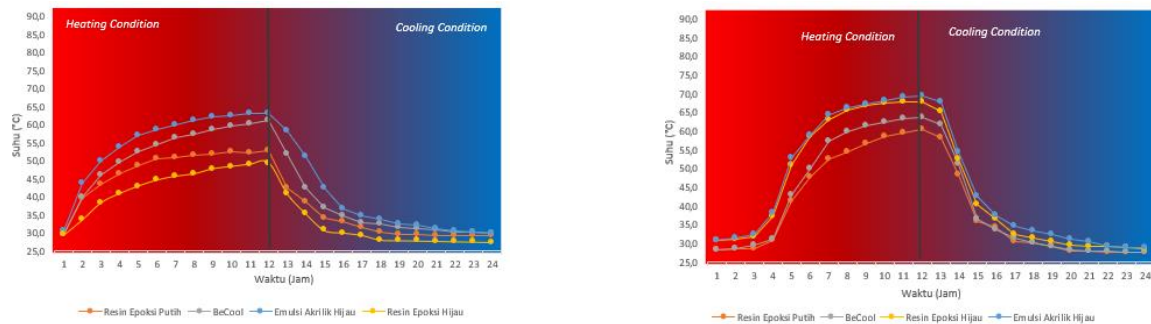
Tabel 2. Penurunan suhu *dense graded* dengan HRC.

Dense dengan HRC	Suhu jam 12	Suhu jam 24	ΔT
Dense 1 dan Dense 5 (Resin Epoksi Putih)	52,8	29,1	23,7
Dense 2 dan Dense 6 (BeCool)	61,4	29,9	31,4
Dense 3 dan Dense 7 (Resin Epoksi Hijau)	49,4	27,5	22,0
Dense 4 dan Dense 8 (Emulsi Akrilik Hijau)	63,3	30,0	33,3

Dari berbagai jenis HRC yang diuji, Resin Epoksi Hijau (*Dense 3* dan *Dense 7*) menunjukkan performa paling unggul, mencapai suhu puncak terendah 49,4°C dan suhu akhir terendah 27,5°C. Keunggulan ini dapat dijelaskan oleh komposisinya yang mencakup proporsi tinggi Titanium Dioksida (TiO_2) sebesar 25,40% sebagai pemantul utama, serta 5% Iron Oxide. Kombinasi ini menciptakan sinergi reflektivitas yang mencakup spektrum inframerah dekat (NIR) dari Iron Oxide, memungkinkan Resin Epoksi Hijau memantulkan energi matahari secara lebih menyeluruh, membuktikan bahwa "*cool pavement*" dapat dicapai dengan formulasi pigmen yang optimal, tidak hanya bergantung pada warna putih.

3.2 Perbandingan antara *Cooling Performance Dense Graded* dengan HRC dan *Cooling Performance Open Graded* dengan HRC

Dari Gambar 5 yang disajikan, perkerasan *dense graded* dengan aplikasi *Heat Reflective Coating* (HRC) menunjukkan keunggulan yang lebih konsisten dalam kinerja pendinginan (*cooling performance*) dibandingkan dengan perkerasan *open graded* dengan HRC. Keunggulan ini sangat jelas terlihat dari kemampuan *dense graded* untuk secara signifikan menjaga suhu puncak permukaannya tetap rendah pada jam ke-12, dengan kisaran antara 49,4°C hingga 63,3°C, jauh di bawah kisaran suhu puncak *open graded* yang mencapai 60,6°C hingga 69,5°C. Kontrol suhu puncak yang lebih rendah ini menjadi indikator vital bahwa HRC pada *dense graded* lebih efektif dalam memantulkan radiasi matahari dan mencegah akumulasi panas berlebih sejak awal. Meskipun *open graded* menunjukkan nilai ΔT (penurunan suhu dari puncak) yang lebih besar, hal ini disebabkan oleh titik awal yang lebih tinggi, bukan efisiensi pendinginan yang lebih baik secara keseluruhan. Yang terpenting, *dense graded* dengan HRC tetap mampu mencapai suhu permukaan akhir yang sangat dingin pada jam ke-24, yaitu antara 27,5°C hingga 30,0°C, yang sebanding atau bahkan sedikit lebih rendah dibandingkan dengan *open graded* (27,5°C–28,8°C). Oleh karena itu, kemampuan *dense graded* untuk memulai dari suhu yang jauh lebih rendah dan tetap berakhir pada suhu yang sangat dingin menjadikannya pilihan yang lebih unggul untuk mencapai kinerja pendinginan aspal yang optimal.



- (a) suhu rata-rata setiap sampel *dense graded* dengan HRC dalam kondisi *heating* dan *cooling* (b) suhu rata-rata setiap sampel *open graded* dengan HRC dalam kondisi *heating* dan *cooling*

Gambar 5. Perbandingan *cooling performance* *dense graded* tanpa HRC dan *open graded* dengan HRC.

Tabel 3. Penurunan suhu *dense graded* dengan HRC.

Dense dengan HRC	Suhu jam 12	Suhu jam 24	ΔT
Dense 1 dan Dense 5 (Resin Epoksi Putih)	52,8	29,1	23,7
Dense 2 dan Dense 6 (BeCool)	61,4	29,9	31,4
Dense 3 dan Dense 7 (Resin Epoksi Hijau)	49,4	27,5	22,0
Dense 4 dan Dense 8 (Emulsi Akrilik Hijau)	63,3	30,0	33,3

Tabel 4. Penurunan suhu *open graded* dengan HRC.

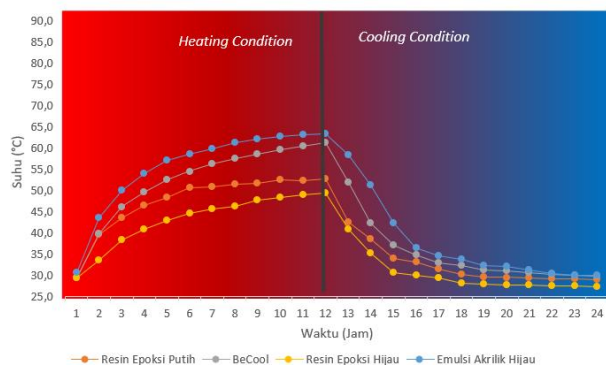
Open dengan HRC	Suhu jam 12	Suhu jam 24	ΔT
Open 1 dan Open 5 (Resin Epoksi Putih)	60,6	27,5	33,2
Open 2 dan Open 6 (BeCool)	63,7	27,6	36,2
Open 3 dan Open 7 (Resin Epoksi Hijau)	67,9	28,5	39,5
Open 4 dan Open 8 (Emulsi Akrilik Hijau)	69,5	28,8	40,7

Berdasarkan Tabel 3 dan Tabel 4, Analisis kinerja pendinginan menunjukkan bahwa Resin Epoksi Hijau (sampel *Dense 3* dan *Dense 7*) adalah jenis *Heat Reflective Coating* (HRC) paling unggul secara keseluruhan. HRC ini mencapai suhu puncak terendah 49,4°C dan suhu akhir terdingin 27,5°C pada perkerasan *dense graded*, menegaskan efektivitas maksimalnya dalam memantulkan radiasi matahari dan mengurangi panas yang terserap. Keunggulan Resin Epoksi Hijau, serta HRC secara umum, berasal dari kombinasi optimal antara reflektivitas tinggi (untuk menolak panas) dan emisivitas tinggi permukaannya (untuk memancarkan panas yang terserap). Struktur *dense graded* yang lebih rapat memungkinkan HRC memantulkan panas lebih efektif dan menjaga suhu puncak awal lebih rendah (49,4°C–63,3°C) dibandingkan *open graded* (60,6°C–69,5°C). Meskipun *open graded* menunjukkan penurunan suhu yang lebih besar (ΔT 33,2–40,7°C berbanding 22,0–33,3°C pada *dense graded*) karena sirkulasi udara di rongga yang memfasilitasi perpindahan panas oleh pergerakan, *dense graded* dengan HRC tetap unggul secara konsisten karena kemampuannya mengontrol suhu puncak yang lebih rendah dan mencapai suhu akhir yang sangat dingin (27,5°C–30,0°C) yang bersaing dengan *open graded* (27,5°C–28,8°C). Ini membuktikan bahwa *dense graded* dengan HRC, didukung oleh HRC yang optimal seperti Resin Epoksi Hijau, menawarkan kinerja pendinginan yang paling unggul kinerjanya dalam menjaga suhu permukaan aspal tetap rendah.

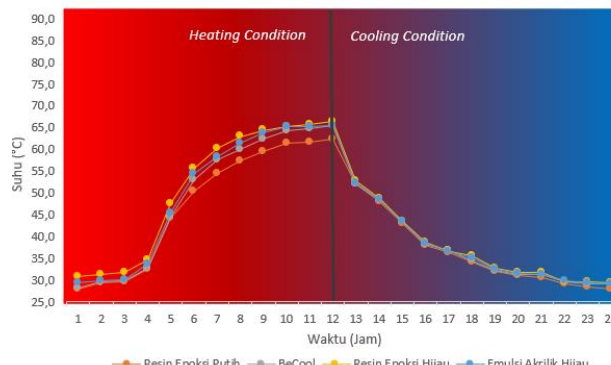
3.3 Perbandingan antara *Cooling Performance Dense Graded* dengan HRC dan *Cooling Performance Gap Graded* dengan HRC

Analisis data dari Gambar 6, Tabel 5, dan Tabel 6 secara menyeluruh menguraikan perbandingan kinerja pendinginan antara perkerasan *dense graded* dan *gap graded* yang diaplikasikan *Heat Reflective Coating* (HRC). Pada fase pemanasan, *dense graded* dengan HRC menunjukkan keunggulan dengan suhu puncak yang lebih rendah (49,4°C–63,3°C) dibandingkan *gap graded* (62,4°C–66,4°C), mengindikasikan efektivitas HRC yang lebih baik dalam memantulkan panas awal pada struktur yang lebih rapat. Meskipun demikian, pada fase pendinginan, *gap graded* menunjukkan nilai ΔT (penurunan suhu dari puncak) yang lebih besar (34,3–37,0) dibandingkan *dense graded* (22,0–33,3), yang dapat dijelaskan oleh struktur rongga *gap graded* yang memfasilitasi perpindahan panas melalui pergerakan yang lebih efisien. Meskipun perbedaan mekanisme ini, kedua jenis perkerasan berhasil mencapai suhu permukaan akhir yang sangat kompetitif (*dense graded*: 27,5°C–30,0°C; *gap graded*: 28,1°C–29,5°C). Secara keseluruhan, *dense graded* dengan HRC mempertahankan suhu puncak yang lebih rendah secara signifikan, yang pada akhirnya menghasilkan suhu akhir yang sangat dingin dan menunjukkan efektivitas optimal dalam mengurangi

beban panas sejak awal, sementara *gap graded* menawarkan mekanisme pelepasan panas yang cepat setelah mencapai puncak suhu.



(a) suhu rata-rata setiap sampel *dense graded* dengan HRC dalam kondisi *heating* dan *cooling*



(b) suhu rata-rata setiap sampel *gap graded* dengan HRC dalam kondisi *heating* dan *cooling*

Gambar 6. Perbandingan *cooling performance* *dense graded* tanpa HRC dan *gap graded* dengan HRC

Tabel 5. Penurunan suhu *dense graded* dengan HRC.

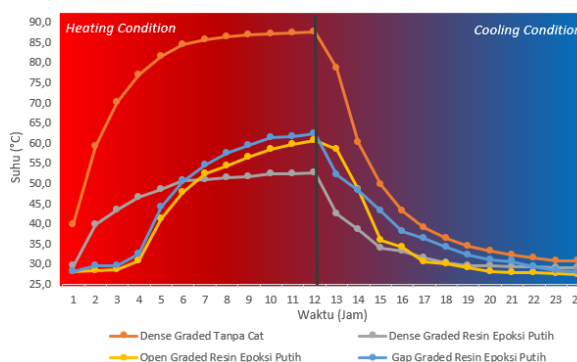
Dense dengan HRC	Suhu jam 12	Suhu jam 24	ΔT
Dense 1 dan Dense 5 (Resin Epoksi Putih)	52,8	29,1	23,7
Dense 2 dan Dense 6 (BeCool)	61,4	29,9	31,4
Dense 3 dan Dense 7 (Resin Epoksi Hijau)	49,4	27,5	22,0
Dense 4 dan Dense 8 (Emulsi Akrilik Hijau)	63,3	30,0	33,3

Tabel 6. Penurunan suhu *gap graded* dengan HRC.

Gap dengan HRC	Suhu jam 12	Suhu jam 24	ΔT
Gap 1 dan Gap 5 (Resin Epoksi Putih)	62,4	28,1	34,3
Gap 2 dan Gap 6 (BeCool)	65,5	29,1	36,4
Gap 3 dan Gap 7 (Resin Epoksi Hijau)	66,4	29,5	37,0
Gap 4 dan Gap 8 (Emulsi Akrilik Hijau)	65,6	29,3	36,4

Berdasarkan data pada Tabel 5, Resin Epoksi Hijau pada *dense graded* teridentifikasi sebagai jenis *Heat Reflective Coating* (HRC) paling unggul secara keseluruhan, menunjukkan kinerja pendinginan yang paling unggul karena kombinasi optimal antara reflektivitas tinggi dan emisivitas tinggi permukaannya. Keunggulan ini sangat jelas terlihat dari kemampuannya mencapai suhu puncak terendah di jam ke-12, yaitu 49,4°C pada perkerasan *dense graded*, yang membuktikan efektivitas maksimal HRC ini dalam memantulkan sebagian besar radiasi matahari, termasuk spektrum inframerah dekat (NIR) berkat formulasi pigmennya (terutama Titanium Dioksida dan Iron Oxide). Selain mencegah penyerapan panas awal, yang lebih penting adalah kemampuannya menghasilkan suhu permukaan akhir terdingin pada jam 24, yakni 27,5°C. Pencapaian suhu akhir yang sangat rendah ini menandakan emisivitas permukaannya yang efisien, memungkinkan panas yang berhasil diserap untuk dipancarkan kembali ke atmosfer dengan cepat. Oleh karena itu, Resin Epoksi Hijau menonjol sebagai HRC yang paling efektif dalam mengurangi beban panas matahari dan menjaga suhu aspal tetap dingin melalui mekanisme refleksi yang kuat dan pemancaran panas yang efisien.

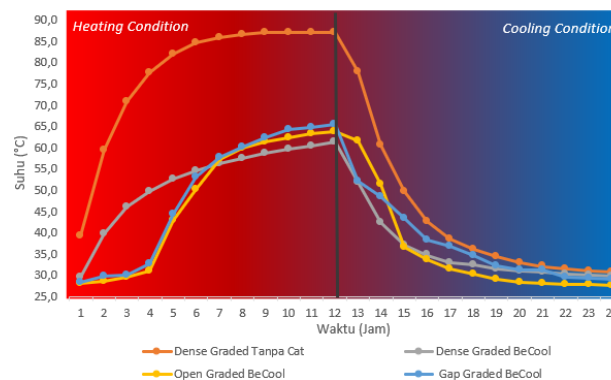
3.4 Pengaruh Tipe Struktur Perkerasan Terhadap Kinerja Resin Epoksi Putih Sebagai *Heat Reflective Coating*



Gambar 7. Pengaruh tipe struktur perkerasan terhadap kinerja resin epoksi putih sebagai HRC.

Berdasarkan Gambar 7 yang disajikan, menunjukkan kinerja pendinginan perkerasan dapat diurutkan dari yang terbaik hingga yang terendah sebagai berikut: *Dense Graded Resin Epoksi Putih* menduduki posisi teratas, menunjukkan keunggulan yang paling signifikan karena kemampuannya dalam mencegah penyerapan panas secara drastis sejak awal, terbukti dari suhu puncaknya yang paling rendah, yakni hanya 52,8°C pada jam ke-12. Kemampuan luar biasa ini berarti perkerasan mengalami tekanan termal yang jauh lebih sedikit sepanjang hari, menjadikannya yang paling efektif dalam menjaga suhu tetap dingin. Pada posisi kedua adalah *Open Graded Resin Epoksi Putih*; meskipun suhu puncaknya sedikit lebih tinggi (60,6°C), ia unggul dalam pelepasan panas dan berhasil mencapai suhu akhir terendah pada jam ke-24, yaitu 27,5°C, berkat struktur rongganya yang memfasilitasi pergerakan udara yang efisien. Menyusul di posisi ketiga adalah *Gap Graded Resin Epoksi Putih*, yang menunjukkan kinerja serupa dengan *Open Graded* namun sedikit di bawah, dengan suhu puncak 62,4°C dan suhu akhir 28,1°C. Terakhir, *Dense Graded Tanpa Cat (Aspal Hitam Umumnya)* berada di posisi terbawah, menunjukkan kinerja pendinginan terburuk dengan suhu puncak tertinggi 87,5°C dan suhu akhir tertinggi 30,7°C, menegaskan bahwa tanpa *Heat Reflective Coating*, aspal menyerap dan mempertahankan panas sangat banyak.

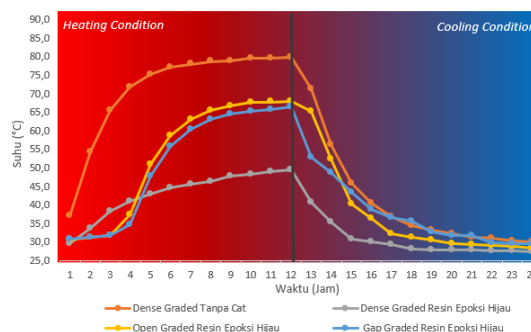
3.5 Pengaruh Tipe Struktur Perkerasan Terhadap Kinerja BeCool Sebagai *Heat Reflective Coating*



Gambar 8. Pengaruh tipe struktur perkerasan terhadap kinerja becool sebagai HRC

Berdasarkan Gambar 8 menunjukkan kinerja pendinginan perkerasan dapat diurutkan dari yang terbaik hingga yang terendah sebagai berikut: *Dense Graded BeCool* menduduki posisi teratas, menunjukkan keunggulan yang paling signifikan karena kemampuannya dalam mencegah penyerapan panas secara drastis sejak awal, terbukti dari suhu puncaknya yang paling rendah, yakni hanya 61,4°C pada jam ke-12. Kemampuan luar biasa ini berarti perkerasan mengalami tekanan termal yang jauh lebih sedikit sepanjang hari, menjadikannya yang paling efektif dalam menjaga suhu tetap dingin. Pada posisi kedua adalah *Open Graded BeCool*; meskipun suhu puncaknya sedikit lebih tinggi (63,7°C), ia unggul dalam pelepasan panas dan berhasil mencapai suhu akhir terendah pada jam ke-24, yaitu 27,6°C, berkat struktur rongganya yang memfasilitasi pergerakan udara yang efisien. Menyusul di posisi ketiga adalah *Gap Graded BeCool*, yang menunjukkan kinerja serupa dengan *Open Graded* namun sedikit di bawah, dengan suhu puncak 65,5°C dan suhu akhir 29,1°C. Terakhir, *Dense Graded Tanpa Cat (Aspal Hitam Umumnya)* berada di posisi terbawah, menunjukkan kinerja pendinginan terburuk dengan suhu puncak tertinggi 87,3°C dan suhu akhir tertinggi 30,8°C, menegaskan bahwa tanpa *Heat Reflective Coating*, aspal menyerap dan mempertahankan panas dengan sangat banyak.

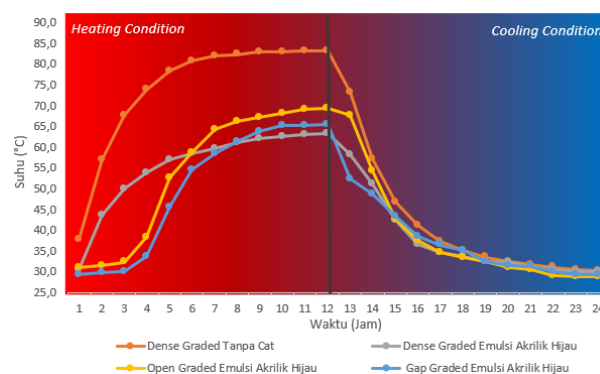
3.6 Pengaruh Tipe Struktur Perkerasan Terhadap Kinerja Resin Epoksi Hijau Sebagai *Heat Reflective Coating*



Gambar 9. Pengaruh tipe struktur perkerasan terhadap kinerja resin epoksi hijau sebagai HRC.

Berdasarkan Gambar 9 yang disajikan, menunjukkan kinerja pendinginan perkerasan dapat diurutkan dari yang terbaik hingga yang terendah sebagai berikut: *Dense Graded* Resin Epoksi Hijau menduduki posisi teratas, menunjukkan keunggulan yang paling signifikan karena kemampuannya dalam mencegah penyerapan panas secara drastis sejak awal, terbukti dari suhu puncaknya yang paling rendah, yakni hanya 49,4°C pada jam ke-12. Kemampuan luar biasa ini berarti perkerasan mengalami tekanan termal yang jauh lebih sedikit sepanjang hari, menjadikannya yang paling efektif dalam menjaga suhu tetap dingin. Pada posisi kedua adalah *Open Graded* Resin Epoksi Hijau; meskipun suhu puncaknya sedikit lebih tinggi (67,9°C), ia unggul dalam pelepasan panas dan berhasil mencapai suhu akhir yang cukup rendah pada jam ke-24, yaitu 28,5°C, berkat struktur rongganya yang memfasilitasi pergerakan udara yang efisien. Menyusul di posisi ketiga adalah *Gap Graded* Resin Epoksi Hijau, yang menunjukkan kinerja serupa dengan *Open Graded* namun sedikit di bawah, dengan suhu puncak 66,4°C dan suhu akhir 29,5°C. Terakhir, *Dense Graded* Tanpa Cat (Aspal Hitam Umumnya) berada di posisi terbawah, menunjukkan kinerja pendinginan terburuk dengan suhu puncak tertinggi 79,9°C dan suhu akhir tertinggi 30,2°C, menegaskan bahwa tanpa *Heat Reflective Coating*, aspal menyerap dan mempertahankan panas secara besar-besaran.

3.7 Pengaruh Tipe Struktur Perkerasan Terhadap Kinerja Emulsi Akrilik Hijau Sebagai *Heat Reflective Coating*

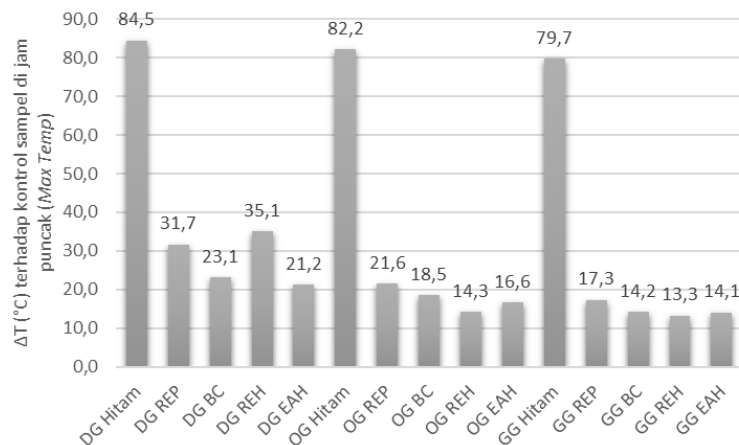


Gambar 10. Pengaruh tipe struktur perkerasan terhadap kinerja emulsi akrilik hijau sebagai HRC.

Berdasarkan Gambar 10 yang disajikan, menunjukkan kinerja pendinginan perkerasan dapat diurutkan dari yang terbaik hingga yang terendah sebagai berikut: *Dense Graded* Emulsi Akrilik Hijau menduduki posisi teratas, menunjukkan keunggulan yang paling signifikan karena kemampuannya dalam mencegah penyerapan panas secara drastis sejak awal, terbukti dari suhu puncaknya yang paling rendah, yakni hanya 63,3°C pada jam ke-12. Kemampuan luar biasa ini berarti perkerasan mengalami tekanan termal yang jauh lebih sedikit sepanjang hari, menjadikannya yang paling efektif dalam menjaga suhu tetap dingin. Pada posisi kedua adalah *Open Graded* Emulsi Akrilik Hijau; meskipun suhu puncaknya sedikit lebih tinggi (69,5°C), ia unggul dalam pelepasan panas dan berhasil mencapai suhu akhir terendah pada jam ke-24, yaitu 28,8°C, berkat struktur rongganya yang memfasilitasi pergerakan udara yang efisien. Menyusul di posisi ketiga adalah *Gap Graded* Emulsi Akrilik Hijau, yang menunjukkan kinerja serupa dengan *Open Graded* namun sedikit di bawah, dengan suhu puncak 65,6°C dan suhu akhir 29,3°C. Terakhir, *Dense Graded* Tanpa Cat (Aspal Hitam Umumnya) berada di posisi terbawah, menunjukkan kinerja pendinginan terburuk dengan suhu puncak tertinggi 87,5°C dan suhu akhir tertinggi 30,7°C, menegaskan bahwa tanpa *Heat Reflective Coating*, aspal menyerap dan mempertahankan panas secara besar-besaran.

3.8 Rekapitulasi Perubahan Suhu Terhadap Kontrol Sampel di Jam Puncak

Dalam penelitian ini, efektivitas berbagai jenis *Heat Reflective Coating* (HRC) dalam mengurangi perbedaan suhu puncak (ΔT) dievaluasi dengan menggunakan tiga jenis material dasar hitam tanpa HRC sebagai kontrol: DG Hitam (*Dense Graded* tanpa HRC) sebagai acuan untuk sampel DG ber-HRC, OG Hitam (*Open Graded* tanpa HRC) sebagai acuan untuk sampel OG ber-HRC, dan GG Hitam (*Gap Graded* tanpa HRC) sebagai acuan untuk sampel GG ber-HRC. Ketiga kontrol hitam ini merepresentasikan kondisi material dasar yang menyerap panas, dengan nilai ΔT masing-masing 84,5°C, 82,2°C, dan 79,7°C terhadap kontrol sampel pada jam puncak (jam ke-12/temperatur maksimum). Selanjutnya, berbagai jenis HRC seperti Resin Epoksi Putih (REP), BeCool (BC), Resin Epoksi Hijau (REH), dan Emulsi Akrilik Hijau (EAH) diaplikasikan pada setiap material dasar, dan nilai ΔT semua jenis HRC diukur untuk menentukan seberapa efektif HRC tersebut dalam menjaga suhu permukaan tetap rendah dibandingkan dengan kontrol material dasar hitam masing-masing.

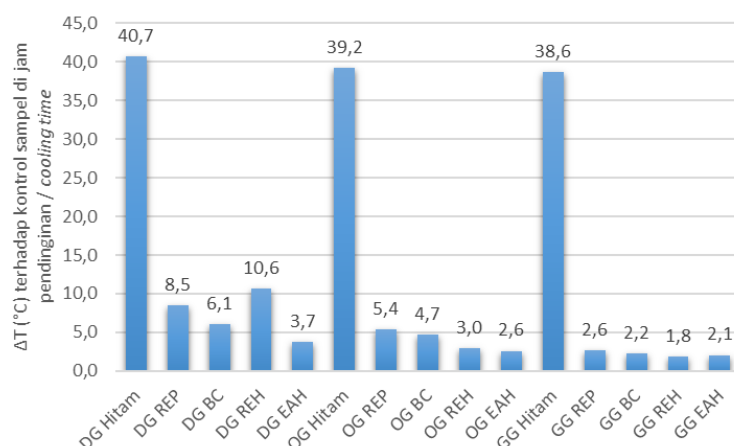


Gambar 11. Perubahan Suhu Terhadap Kontrol Sampel di Jam Puncak.

Pada Gambar 11 secara jelas menyajikan evaluasi perubahan suhu puncak (ΔT) perkerasan yang telah diaplikasikan *Heat Reflective Coating* (HRC) dibandingkan dengan sampel kontrol hitam (tanpa HRC) dari jenis gradasi yang berbeda. Nilai ΔT ini secara spesifik menunjukkan seberapa besar penurunan suhu di jam puncak yang berhasil dicapai oleh HRC, di mana nilai yang lebih tinggi mengindikasikan efektivitas yang sangat tinggi dalam mengurangi suhu puncak. Pada *Dense Graded*, Resin Epoksi Hijau (DG REH) menunjukkan performa paling unggul dengan penurunan suhu puncak sebesar 35,1°C. Sementara itu, baik pada *Open Graded* (OG) maupun *Gap Graded* (GG), Resin Epoksi Putih (OG REP dan GG REP) terbukti menjadi HRC paling efektif dalam kelompoknya masing-masing, berhasil menurunkan suhu puncak OG dari 82,2°C menjadi 21,6°C, dan suhu puncak GG dari 79,7°C menjadi 17,3°C. Secara keseluruhan, semua jenis HRC terbukti efektif mengurangi suhu puncak dibandingkan kontrol hitamnya, namun Resin Epoksi Hijau pada *Dense Graded* (DG REH) menonjol sebagai yang paling efektif dalam menekan kenaikan suhu pada perkerasan jenis *Dense Graded*.

3.9 Rekapitulasi Perubahan Suhu Terhadap Kontrol Sampel di Jam Pendinginan / *Cooling Time*

Selain analisis suhu puncak, penelitian ini juga mengkaji perubahan suhu rata-rata selama periode pendinginan (jam ke-13 hingga jam ke-24) untuk memahami kemampuan material dalam melepaskan panas. Untuk tujuan ini, tiga jenis material hitam tanpa lapisan *Heat Reflective Coating* (HRC) dijadikan sebagai kontrol: DG Hitam (*Dense Graded* tanpa HRC), OG Hitam (*Open Graded* tanpa HRC), dan GG Hitam (*Gap Graded* tanpa HRC). Ketiga kontrol ini berfungsi sebagai acuan dasar untuk membandingkan seberapa cepat atau signifikan perubahan suhu yang terjadi pada material-material yang telah diaplikasikan berbagai jenis HRC, meliputi Resin Epoksi Putih (REP), BeCool (BC), Resin Epoksi Hijau (REH), dan Emulsi Akrilik Hijau (EAH), selama fase pendinginan setelah mencapai suhu puncaknya.



Gambar 12. Perubahan Suhu Terhadap Kontrol Sampel di Jam Pendinginan.

Terlihat pada Gambar 12, material HRC berhasil mencapai suhu yang lebih rendah dibandingkan kontrolnya, maka dapat diidentifikasi material HRC dengan kinerja pendinginan terbaik. Dalam kelompok *Dense Graded* (DG),

material DG REH menunjukkan kinerja unggul dengan nilai ΔT sebesar $10,6^{\circ}\text{C}$. Sementara itu, untuk kelompok *Open Graded* (OG), OG REP menjadi yang terbaik dengan ΔT $5,4^{\circ}\text{C}$, dan pada kelompok *Gap Graded* (GG), GG REP memimpin dengan ΔT $2,6^{\circ}\text{C}$. Jika membandingkan seluruh material ber-HRC dari semua kelompok, DG REH menonjol sebagai material dengan kemampuan pendinginan rata-rata paling efektif karena menghasilkan selisih suhu terbesar ($10,6^{\circ}\text{C}$) terhadap kontrolnya, menunjukkan efisiensinya dalam melepaskan panas selama periode pendinginan.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian, Aplikasi *Heat-Reflective Coating* (HRC) terbukti sangat efektif dalam menurunkan suhu permukaan perkerasan aspal, terutama selama kondisi pemanasan di siang hari. Secara keseluruhan, Resin Epoksi Hijau yang diaplikasikan pada *Dense Graded* menunjukkan performa pendinginan paling unggul, berhasil mencapai suhu puncak terendah ($49,4^{\circ}\text{C}$) dan suhu akhir terdingin ($27,5^{\circ}\text{C}$). Keunggulan ini disebabkan oleh komposisi pigmen optimalnya, termasuk Titanium Dioksida dan Iron Oxide, yang secara efektif memantulkan radiasi matahari, termasuk spektrum inframerah dekat. Meskipun gradasi terbuka (*Open Graded*) dan gradasi celah (*Gap Graded*) menunjukkan penurunan suhu yang lebih besar dari suhu puncaknya karena sirkulasi udara yang lebih baik, *Dense Graded* dengan HRC tetap unggul dalam menjaga suhu puncak yang lebih rendah dan mencapai suhu akhir yang sangat dingin, menjadikannya pilihan optimal untuk mitigasi Urban Heat Island (UHI).

Penelitian ini juga mengevaluasi efektivitas berbagai HRC dalam mengurangi suhu puncak perkerasan aspal, dibandingkan dengan sampel kontrol hitam tanpa HRC dari berbagai jenis gradasi. Nilai ΔT yang lebih tinggi menunjukkan penurunan suhu puncak yang lebih besar, mengindikasikan efektivitas HRC yang sangat tinggi dalam mitigasi suhu. Pada *Dense Graded*, Resin Epoksi Hijau (DG REH) menunjukkan performa paling unggul dengan penurunan suhu puncak sebesar $35,1^{\circ}\text{C}$. Sementara itu, baik pada *Open Graded* (OG) maupun *Gap Graded* (GG), Resin Epoksi Putih (OG REP dan GG REP) terbukti menjadi HRC paling efektif dalam kelompoknya masing-masing, berhasil menurunkan suhu puncak OG dari $82,2^{\circ}\text{C}$ menjadi $21,6^{\circ}\text{C}$, dan suhu puncak GG dari $79,7^{\circ}\text{C}$ menjadi $17,3^{\circ}\text{C}$. Secara keseluruhan, semua jenis HRC terbukti efektif mengurangi suhu puncak dibandingkan kontrol hitamnya, namun Resin Epoksi Hijau pada *Dense Graded* (DG REH) menonjol sebagai yang paling efektif dalam menekan kenaikan suhu pada perkerasan jenis *Dense Graded*. Selain itu, analisis selama fase pendinginan menunjukkan bahwa meskipun sampel kontrol hitam memiliki beban panas sisa yang tinggi, aplikasi HRC secara drastis mengurangi beban panas ini. Dalam kelompok *Dense Graded* (DG), material DG REH menunjukkan kinerja unggul dengan nilai ΔT sebesar $10,6^{\circ}\text{C}$. Sementara itu, untuk kelompok *Open Graded* (OG), OG REP menjadi yang terbaik dengan ΔT $5,4^{\circ}\text{C}$, dan pada kelompok *Gap Graded* (GG), GG REP memimpin dengan ΔT $2,6^{\circ}\text{C}$. Jika membandingkan seluruh material ber-HRC dari semua kelompok, DG REH menonjol sebagai material dengan kemampuan pendinginan rata-rata paling efektif karena menghasilkan selisih suhu terbesar ($10,6^{\circ}\text{C}$) terhadap kontrolnya, menunjukkan efisiensinya dalam melepaskan panas selama periode pendinginan. Hal ini mengindikasikan bahwa efisiensi pendinginan sangat bergantung pada interaksi kompleks antara sifat *coating* dan karakteristik termal spesifik dari struktur perkerasan.

REFERENSI

- Akbari, H., Matthews, H.D., (2012). "Global cooling updates: Reflective roofs and pavements, dalam: Energy and Buildings". hlm. 2–6. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.055>
- Alhaqi, D.H., Nazalanzilni, A., Rahman, T., (2024). "Evaluation of the cooling performance of various heat-reflective cool pavement coatings for Urban Heat Island mitigation", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Institute of Physics. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1416/1/012005>
- Chen, Y., Li, Z., Ding, S., Yang, X., Guo, T., (2022). "Research on heat reflective coating technology of asphalt pavement". International Journal of Pavement Engineering 23, 4455–4464. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1952410>
- Cichowicz, R., Bochenek, A.D., (2024). "Assessing the effects of urban heat islands and air pollution on human quality of life". Anthropocene. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2024.100433>
- García Mainieri, J.J., Sen, S., Roesler, J., Al-Qadi, I.L., (2022). "Albedo Change Mechanism of Asphalt Concrete Surfaces". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2676, 763–772. <https://doi.org/10.1177/03611981221082567>

- Jiang, L., Wang, L., Wang, S., (2019). "A novel solar reflective coating with functional gradient multilayer structure for cooling asphalt pavements" *Contrasting interactions of urban heat islands with dry and moist heat waves and their implications for urban heat stress*. *Urban Clim* 56. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102050>
- Kim, D.H., Park, K., Baik, J.J., Jin, H.G., Han, B.S., (2024). "Contrasting interactions of urban heat islands with dry and moist heat waves and their implications for urban heat stress." *Urban Clim* 56. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102050>
- Rahman, T., Zudhy Irawan, M., Noor Tajudin, A., Rizka Fahmi Amrozi, M., Widyatmoko, I., (2023). "Knowledge mapping of cool pavement technologies for urban heat island Mitigation: A Systematic bibliometric analysis." *Energy Build.* <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113133>
- Rahman, T., Suhendri, Tajudin, A.N., Suwanto, F., Sudigdo, P., Thom, N., (2024). "Durability evaluation of heat-reflective coatings for road surfaces: A systematic review". *Sustain Cities Soc.* <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105625>
- Riaz, A., Yasir, N., Badin, G., Mahmood, Y., (2024). "Innovative Pavement Solutions: A Comprehensive Review from Conventional Asphalt to Sustainable Colored Alternatives". *Infrastructures (Basel)* 9, 186. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9100186>
- Synnefa, A., Santamouris, M., Livada, I., (2006). "A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment". *Solar Energy* 80, 968–981. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.08.005>
- Thushara, V.T., Murali Krishnan, J., (2020). "Permanent Deformation Characterisation of Gap-Graded and Continuous Graded Aggregate Blends for Bituminous Mixtures". *hlm.* 493–505. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48679-2_47
- 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*". <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.092>
- Yu, F., Guo, J., Liu, J., Cai, H., Huang, Y., (2023). "A review of the pore structure of pervious concrete: Analyzing method, characterization parameters and the effect on performance". *Constr Build Mater.* <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129971>