

KAJIAN LITERATUR PENGARUH NANOMATERIAL DAN KAPUR PADA CAMPURAN ASPAL

Cindhy Devianti Widyasaputri; Sri Sunarjono

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Abstrak

Campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) menghadapi tuntutan kinerja yang tinggi akibat beban lalu lintas dan kondisi lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh penambahan nanomaterial dan kapur terhadap kinerja campuran aspal melalui studi literatur. Data diperoleh dari artikel jurnal dan penelitian terdahulu yang membahas nano karbon, Carbon Nanotubes (CNT), graphene, hydrated lime, dan bahan berbasis kapur. Literatur dikelompokkan berdasarkan jenis bahan tambah dan dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan hasil pengujian Indirect Tensile Strength (ITS), Marshall, serta parameter ketahanan terhadap kelembapan. Hasil kajian menunjukkan bahwa nanomaterial dapat meningkatkan kekuatan tarik dan stabilitas campuran hingga kadar optimum, sedangkan dosis berlebih dapat menurunkan kinerja akibat aglomerasi. Kapur terhidrasi dan nano hydrated lime menunjukkan potensi meningkatkan ketahanan campuran terhadap kerusakan akibat kelembapan. Perbedaan metode pengujian antarpelelitian membatasi perbandingan langsung sehingga diperlukan pengujian laboratorium dengan metode yang seragam.

Kata kunci: AC-WC, kapur, nanomaterial, perkerasan jalan

Abstract

Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) mixtures are required to maintain high performance under traffic loading and environmental conditions. This study reviews the effects of nanomaterials and lime on asphalt mixture performance through a literature review. Data were obtained from journal articles and previous studies concerning nano carbon, Carbon Nanotubes (CNT), graphene, hydrated lime, and lime-based fillers. The literature was grouped according to additive type and descriptively analyzed by comparing Indirect Tensile Strength (ITS), Marshall, and moisture-resistance results. The review indicates that nanomaterials can improve tensile strength and mixture stability up to an optimum content, while excessive dosage may reduce performance due to particle agglomeration. Hydrated lime and nano hydrated lime also show potential to improve resistance to moisture-related damage. Differences in testing methods among studies limit direct comparison, indicating the need for laboratory testing using a consistent testing framework.

Keywords: AC-WC, asphalt mixture, lime, nanomaterial

1. PENDAHULUAN

Perkembangan suatu negara sangat bergantung pada infrastrukturnya, terutama infrastruktur jalan raya, yang menjadi faktor penentu kelancaran mobilitas dan perekonomian. Perkerasan jalan merupakan salah satu komponen penting dalam infrastruktur transportasi, dan campuran aspal AC-WC sebagai lapisan aus paling atas berperan besar dalam menjaga keamanan dan kenyamanan berkendara (Sukirman, 2010). Meskipun kualitas campuran AC-WC pada umumnya sudah baik, perkerasan jalan masih sering mengalami kerusakan seperti

retak dan deformasi akibat perubahan suhu yang drastis dan beban lalu lintas yang berat (Suciati et al., 2023; Du et al., 2018).

Salah satu upaya peningkatan kinerja campuran aspal adalah penambahan bahan nanomaterial. Struktur nano karbon yang memiliki daya ikat kuat dengan molekul aspal diharapkan mampu meningkatkan kekuatan tarik campuran sehingga lebih tahan terhadap keretakan (Bhargava et al., 2016; Ahmad et al., 2025). Kajian internasional menunjukkan bahwa modifikasi aspal dengan nanomaterial seperti nanosilika, nano titanium dioksida, dan nano karbon secara umum mampu meningkatkan viskositas, ketahanan *rutting*, ketahanan lelah, serta ketahanan penuaan campuran aspal dibandingkan aspal tanpa modifikasi (Iftikhar et al., 2022). Selain nanomaterial, kapur terhidrasi (*hydrated lime*) dipilih sebagai bahan pengisi karena sifatnya yang hidrolis dan tahan terhadap pelapukan, serta mampu meningkatkan durabilitas campuran aspal terhadap beban lalu lintas dan kelembapan (Padallingan et al., 2024; Lesueur et al., 2013).

Kajian pustaka lebih lanjut menunjukkan bahwa penelitian mengenai pengaruh nanomaterial dan kapur pada campuran aspal umumnya masih dilakukan secara terpisah untuk setiap jenis bahan tambah, dengan metode uji, jenis campuran, dan rentang kadar yang berbeda-beda antarpelelitian, sehingga efektivitas antarbahan tambah belum dapat dibandingkan secara langsung dalam satu kerangka evaluasi yang sama (Aljbouri & Albayati, 2023). Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh penambahan nanomaterial (nano karbon, *carbon nanotubes*, dan *graphene*) serta kapur terhadap kinerja campuran aspal berdasarkan sintesis temuan-temuan penelitian terdahulu, sekaligus mengidentifikasi kesenjangan penelitian (*research gap*) yang dapat menjadi arah penelitian lanjutan.

2. METODOLOGI

Pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran pustaka berbasis basis data ilmiah seperti Google Scholar, ScienceDirect, dan repositori perguruan tinggi menggunakan kata kunci "nanomaterial", "nano karbon", "*graphene*", "*carbon nanotubes*", "*hydrated lime filler asphalt*", "*Indirect Tensile Strength*", dan "*Marshall*". Tahapan penelitian meliputi: perumusan masalah dan pengumpulan informasi awal; pengumpulan data dari berbagai pustaka terkait; pengelompokan data berdasarkan jenis bahan tambah dan pengaruhnya terhadap kinerja campuran; penarikan kesimpulan dan saran. Analisis dilakukan dengan menyintesis temuan penelitian terdahulu ke dalam tiga sudut pandang tematik yang berlaku lintas jenis bahan tambah, yaitu mekanisme fisik-kimiawi peningkatan kinerja, hubungan dosis bahan tambah dengan kinerja campuran, serta keterbatasan metodologis penelitian terdahulu.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3. 1 Pengaruh Nanomaterial Pada Campuran Aspal

Konstruksi jalan raya modern menuntut mampu menahan beban lalu lintas yang semakin berat dan perubahan cuaca yang ekstrem. Lapisan Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) sebagai lapisan paling atas yang bersentuhan langsung dengan roda kendaraan memegang peran penting dalam menjaga keamanan dan kenyamanan berkendara. Di tengah pencarian material alternatif untuk meningkatkan performa aspal, teknologi nano khususnya penggunaan nanomaterial.

3.1.1 Pengaruh Nano Karbon Pada Campuran Aspal

Ditinjau dari mekanismenya, partikel nano karbon bekerja dengan mengisi rongga mikro dalam mastik aspal dan memperkuat ikatan antarmolekul hidrokarbon, sehingga meningkatkan kekakuan dan ketahanan terhadap deformasi (Iftikhar et al., 2022). Prinsip serupa juga berlaku pada karbon hitam (*carbon black*) berbasis limbah ban yang terbukti mampu meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan penuaan aspal melalui mekanisme

penguatan permukaan partikel yang analog (Li et al., 2018). Dari sisi hubungan dosis-kinerja, studi nasional yang dilakukan pada campuran AC-WC (Rahmawati & Sunarjono, 2024; Pujiatmoko & Sunarjono, 2023) menunjukkan pola non-linear: peningkatan kinerja pada dosis rendah-menengah, diikuti penurunan pada dosis tinggi akibat aglomerasi partikel, konsisten dengan pola umum yang dilaporkan pada tinjauan literatur internasional bahan nano karbon (Iftikhar et al., 2022).

Penelitian Rahmawati & Sunarjono, (2024) mengenai analisis karakteristik ITS dan durabilitas campuran AC-WC menggunakan aspal nano karbon menunjukkan bahwa penerapan teknologi nano pada aspal memerlukan presisi dosis yang sangat ketat, karena sifat fisis material nano yang unik. Pengujian Indirect Tensile Strength (ITS) digunakan untuk mengukur kemampuan campuran aspal menahan tegangan tarik, yang berkaitan langsung dengan ketahanan jalan terhadap retak (*cracking*). Hasil penelitian menunjukkan penurunan nilai ITS secara progresif seiring meningkatnya kadar nano karbon, dari 954,094 kPa pada kondisi kontrol (0 ppm) menjadi 394,718 kPa pada kadar 2000 ppm,

Hasil tersebut membuktikan bahwa penambahan nano karbon di atas 1000 ppm merusak ikatan adhesi antara aspal modifikasi dengan agregat, sehingga air dapat menyusup ke dalam rongga perkerasan dan melepaskan ikatan aspal (*stripping*), yang dapat memicu kerusakan dini seperti lubang (*potholes*). Fenomena penurunan performa pada dosis tinggi dapat dijelaskan melalui dua mekanisme, yaitu efek aglomerasi (*agglomeration*) dan peningkatan kekakuan (*stiffness*) yang berlebihan.

Penelitian Pujiatmoko & Sunarjono, (2023) pengujian campuran AC-WC dengan penambahan serbuk nano karbon (*carbon nano powder*) pada variasi kadar 0 ppm, 200 ppm, 1000 ppm, dan 2000 ppm. Hasil penelitian menunjukkan nilai Retained Marshall Stability (RMS) sebesar 93,90% pada kadar 2000 ppm, sebagaimana disajikan pada Tabel 2 dan

Kajian internasional mengenai modifikasi aspal dengan nanomaterial menunjukkan bahwa nano karbon mampu meningkatkan viskositas, ketahanan rutting, dan ketahanan lelah campuran aspal, peningkatan performa sangat bergantung pada dosis optimum dan tingkat dispersi partikel dalam matriks bitumen, karena dosis berlebih justru menimbulkan aglomerasi yang menurunkan kinerja (Iftikhar et al., 2022). Kedua penelitian nasional di atas (Rahmawati & Sunarjono, 2024; Pujiatmoko & Sunarjono, 2023) konsisten dengan temuan tersebut, yaitu terjadinya penurunan performa pada kadar nano karbon tinggi. Meskipun demikian, penelitian nasional yang ada baru menguji parameter ITS dan Marshall pada rentang kadar 0-2000 ppm dengan satu jenis nano karbon, sehingga belum banyak mengeksplorasi variasi jenis nano karbon (misalnya carbon black, nano karbon berbasis limbah, atau kombinasi dengan aditif lain) maupun pengujian ketahanan jangka panjang (*fatigue, aging*) sebagaimana yang lebih banyak dikaji pada literatur internasional.

Empat studi tambahan memperkuat dan memperluas temuan di atas. Rafi et al. (2018) dan Zarei et al. (2022) sama-sama meneliti nano carbon black secara spesifik pada campuran aspal, dengan Zarei et al. (2022) menunjukkan bahwa pada kadar rendah stabilitas Marshall justru menurun sebelum ketahanan rutting meningkat tajam di atas kadar 10%, sebuah pola dosis-kinerja yang melengkapi temuan non-linear dari penelitian nasional. Rasheed et al. (2025) memperluas konteks pengujian ke aspal daur ulang (*reclaimed asphalt pavement/RAP*), sudut pandang yang belum tersentuh pada studi sebelumnya. Sementara itu, Ahmed & Majid (2026) membandingkan tiga bentuk nano karbon (nano grafit, MWCNT, dan nano carbon black) sekaligus, dan menemukan bahwa MWCNT memberikan dispersi dan ketahanan deformasi permanen terbaik, sehingga menunjukkan bahwa efektivitas nano karbon tidak hanya ditentukan oleh dosis, tetapi juga oleh bentuk partikelnya (Ahmed & Majid, 2026).

3.1.2 Pengaruh Carbon Nanotubes(CNT) Pada Campuran Aspal

Temuan ini turut mempersempit gap penelitian pada aspek jenis nano karbon yang sebelumnya hanya diuji satu jenis. Secara mekanistik, carbon nanotubes (CNT) meningkatkan

kinerja aspal melalui pembentukan jaringan mikrostruktur yang kompleks serta luas permukaan spesifik yang besar, sehingga memperkuat ikatan adhesif antara aspal dan agregat (Haq et al., 2018). Kajian rheologi internasional menegaskan bahwa CNT juga meningkatkan viskositas, kekakuan suhu tinggi, dan ketahanan rutting binder aspal, dengan kinerja optimum umumnya tercapai pada kisaran dosis 1-1,5% berat binder (Ezzat et al., 2023; Shams et al., 2025). Terkait hubungan dosis-kinerja, penelitian nasional pada campuran AC-WC (Eisa et al., 2022; Akbar et al., 2025) menunjukkan pola yang konsisten dengan literatur internasional, yakni performa optimum pada dosis rendah (0,015-0,5%) diikuti penurunan pada dosis lebih tinggi akibat aglomerasi partikel CNT dalam matriks aspal (Zahedi et al., 2017). Yang membedakan, penelitian internasional umumnya turut mengevaluasi metode dispersi (misalnya sonikasi) untuk mengatasi aglomerasi tersebut, sementara penelitian nasional yang tersedia belum banyak mengkaji aspek ini.

Penelitian Eisa et al., (2022) yang meneliti asphalt concrete modified with carbon nanotubes (CNT). Melalui pengujian Indirect Tensile Test, penelitian tersebut membuktikan adanya peningkatan kekuatan tarik tertinggi pada kadar 0,5% , sebagaimana disajikan pada Gambar 3 berikut.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Eisa et al., (2022) menunjukkan peningkatan pada kadar CNT 0,5% tetapi pada saat penambahan kadar CNT 1% mengalami penurunan hal ini disebabkan adanya penggumpalan pada dosis tinggi.

Temuan Akbar et al. (2025) dalam penelitiannya mengenai pengaruh Carbon Nanotubes (CNT) terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC menggunakan aspal penetrasi 60/70 menunjukkan bahwa stabilitas campuran meningkat secara konsisten dari 1.737,07 kg (kontrol, 0% CNT) hingga mencapai nilai optimum 2.177,8 kg pada kadar CNT 0,015%, setara dengan peningkatan stabilitas sebesar 25,4% terhadap campuran kontrol, sebagaimana disajikan pada Tabel 5.4 dan Gambar 5.4. Pada Tabel 5.5 disajikan penggabungan hasil kedua penelitian mengenai penambahan Carbon Nanotubes (CNT)

Temuan Eisa et al. (2022) dan Akbar et al. (2025) sejalan dengan kajian literatur internasional yang menyatakan bahwa carbon nanotubes secara konsisten meningkatkan sifat mekanik campuran aspal melalui dispersi homogen dalam bitumen, meskipun tantangan utama yang dilaporkan secara luas adalah kecenderungan aglomerasi pada dosis tinggi yang justru menurunkan performa (Haq et al., 2018). Kedua penelitian nasional di atas menguji CNT pada campuran AC-WC menggunakan parameter ITS dan Marshall, keduanya belum mengkaji metode dispersi CNT (misalnya penggunaan surfaktan atau ultrasonikasi) yang menurut literatur internasional berpengaruh signifikan terhadap homogenitas campuran dan efektivitas CNT dalam matriks aspal. Secara mekanistik, graphene dan graphene oxide (GO) meningkatkan kinerja campuran aspal melalui penguatan antarmuka aspal-agregat serta pembentukan struktur bee like pada permukaan aspal yang berkontribusi terhadap ketahanan penuaan (Li et al., 2021).

3.1.3 Pengaruh Graphene Pada Campuran Aspal

Karakterisasi mikrostruktur berbasis Atomic Force Microscopy (AFM) pada penelitian internasional menunjukkan bahwa graphene memfasilitasi nukleasi struktur mikro tersebut sehingga meningkatkan kekakuan dan ketahanan retak suhu rendah (Li et al., 2022). Dari sisi ketersediaan bahan baku, graphene oxide yang digunakan pada penelitian-penelitian tersebut umumnya disintesis melalui oksidasi kimia grafit (metode Hummer), dan penelitian dalam negeri telah membuktikan bahwa oksida grafena tereduksi (rGO) juga dapat disintesis dari sumber karbon alternatif berbiaya rendah seperti arang tempurung kelapa, yang dikonfirmasi melalui karakterisasi FTIR, UV-Vis, dan XRD (Hidayat et al., 2019).

Temuan ini membuka peluang produksi graphene oxide secara mandiri dan lebih terjangkau untuk aplikasi modifikasi aspal di Indonesia, alih-alih bergantung pada graphene komersial impor. Terkait hubungan dosis-kinerja, penelitian nasional (Annura et al., 2024; Nasution et al., 2025) menunjukkan pola optimum pada kadar rendah (0,01-0,04%) dengan

penurunan pada dosis lebih tinggi, konsisten dengan temuan internasional bahwa dosis graphene yang berlebihan menimbulkan aglomerasi dan menurunkan homogenitas distribusi dalam matriks aspal. Perbedaan utama dengan literatur internasional terletak pada kedalaman karakterisasi: penelitian nasional yang ada masih berhenti pada parameter Marshall makroskopik, sedangkan penelitian internasional umumnya dilengkapi analisis mikrostruktur (AFM, SEM, atau FTIR) untuk memverifikasi mekanisme interaksi graphene-bitumen secara langsung.

Annura et al. (2024) meneliti pengaruh penambahan graphene terhadap kinerja campuran AC-WC pada variasi kadar 0,01%, 0,02%, 0,03%, 0,04%, dan 0,05% dari berat aspal. Hasil pengujian Marshall menunjukkan bahwa penambahan graphene meningkatkan nilai stabilitas rata-rata sebesar 7,19% terhadap campuran kontrol, dengan nilai optimum sebesar 1902,0 kg tercapai pada kadar 0,04% graphene, sebagaimana disajikan pada

Penurunan stabilitas pada kadar graphene di atas 0,04% disebabkan oleh kecenderungan graphene untuk beraglomerasi atau menggumpal pada dosis berlebih, sehingga mengurangi dispersibilitas dalam campuran aspal dan efektivitasnya dalam meningkatkan sifat mekanik campuran. Seluruh nilai VIM (4,70–4,97%) dan VMA ($\geq 15\%$) pada setiap variasi graphene memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yang menunjukkan bahwa graphene mampu mengisi rongga mikro di dalam campuran tanpa mengurangi kapasitas struktural agregat.

Penelitian Nasution et al., (2025) meneliti pengaruh variasi suhu pemadatan serta penambahan graphene terhadap parameter pengujian Marshall. Hasil penelitian menunjukkan pada kadar graphene 0,01% serta pada suhu pemadatan 140°C meningkatkan nilai stabilitas sebesar 1711,367 kg, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5.7 dan Gambar 5.6. Pada Tabel 5.8 disajikan penggabungan hasil kedua penelitian mengenai penambahan graphene.

Hasil penelitian Annura et al. (2024) dan Nasution et al. (2025) memperkuat temuan literatur internasional bahwa graphene dan turunannya (graphene oxide) mampu meningkatkan stabilitas dan modulus kekakuan campuran aspal melalui mekanisme penguatan antarmuka aspal-agregat, meskipun performa optimalnya sangat sensitif terhadap dosis dan metode pencampuran (Li et al., 2021). Kedua penelitian nasional tersebut menunjukkan pola serupa, yakni penurunan stabilitas pada dosis graphene berlebih akibat *aglomerasi*. Penelitian yang ada masih terbatas pada uji Marshall konvensional dan belum menjangkau karakterisasi mikrostruktur (misalnya SEM atau FTIR) untuk memverifikasi mekanisme interaksi graphene dengan bitumen sebagaimana lazim dilakukan pada penelitian internasional.

3.2 Pengaruh Kapur Pada Campuran Aspal

Secara mekanistik, kapur terhidrasi (hydrated lime) berfungsi sebagai active filler yang bekerja melalui dua jalur utama: penguatan kimiawi ikatan aspal-agregat sehingga menahan pengelupasan (*stripping*) akibat air, dan perlambatan oksidasi bitumen yang memperlambat penuaan aspal (Lesueur et al., 2013). Kajian mekanistik lain menegaskan bahwa efek tersebut bersifat sinergis antara penguatan mastik, peningkatan ketangguhan, dan perbaikan karakteristik ikatan pada antarmuka mastik-agregat (Little & Petersen, 2005). Terkait hubungan dosis-kinerja, penelitian nasional dan internasional menunjukkan pola yang konsisten: peningkatan ketahanan terhadap kelembapan dan stabilitas pada kadar kapur menengah, dengan kecenderungan penurunan pada dosis berlebih (Al-Marafi, 2021; Ahmad et al., 2025).

Temuan ini juga selaras dengan penelitian yang menggunakan abu batu kapur sebagai filler AC-WC, yang menunjukkan kadar optimum sebesar 4% menghasilkan stabilitas Marshall 2780,08 kg dan memenuhi seluruh parameter Bina Marga (Is Dayanti et al., 2024), serta penelitian pada campuran AC-BC dengan filler kapur 10% yang mencapai stabilitas 3144,97 kg pada kadar aspal optimum 6% (Zulkarnain & Hidayat, 2023). Perbedaan yang mencolok antar keempat penelitian tersebut adalah metode pengujian yang digunakan

(ITS/TSR vs Marshall/stabilitas sisa) serta jenis campuran (AC-WC vs AC-BC) belum diseragamkan, sehingga hasilnya sulit dibandingkan secara langsung dalam satu kerangka evaluasi yang sama. Sebagai pembanding metodologis, penelitian pada filler alternatif lain seperti limbah marmer dan abu sekam padi juga menggunakan pendekatan pengujian ITS serupa dan menunjukkan bahwa karakteristik kimiawi filler (kandungan CaO pada limbah marmer, silika reaktif pada abu sekam) turut menentukan besarnya peningkatan kuat tarik campuran (Badaron et al., 2019), mengindikasikan bahwa komposisi kimia kapur turut menjadi variabel penting yang belum banyak dieksplorasi secara sistematis pada penelitian kapur di atas.

Penelitian Al-Marafi, (2021) menjelaskan dalam penelitiannya mengenai pengaruh hydrated lime (HL) dan nano hydrated lime (NHL) terhadap kerentanan campuran aspal akibat kelembapan. Al-Marafi, (2021) menemukan bahwa penambahan HL kadar 20% dan NHL kadar 30% masing-masing meningkatkan nilai Tensile Strength Ratio (TSR) sebesar 78,6% dan 70,6% dibandingkan campuran tanpa kapur, sebagaimana disajikan pada Tabel 5.9 dan Gambar 5.7.

Penelitian Ahmad, (2025) meneliti mengenai efektivitas penambahan kapur sebagai filler pada campuran AC-WC terhadap pengaruh beban dinamis serta kelembapan. Kadar kapur yang dipakai pada penelitiannya sebesar 0%, 25%, 50%, dan 75% yang menunjukkan hasil meningkatkan nilai stabilitas sisa sebesar 94,5% pada kadar kapur 50%. Akan tetapi mengalami penurunan pada kadar 75% sebesar 92,4%, sebagaimana disajikan pada Tabel 5.10 dan Gambar 5.8. Pada Tabel 5.11 disajikan penggabungan hasil empat penelitian mengenai penambahan kapur, termasuk dua penelitian tambahan yang menggunakan abu batu kapur dan filler kapur pada campuran AC-WC dan AC-BC.

Temuan Al-Marafi (2021) dan Ahmad et al. (2025) menegaskan bahwa hydrated lime dan nano hydrated lime efektif meningkatkan ketahanan campuran aspal terhadap kerusakan akibat kelembapan, konsisten dengan kajian internasional yang menyebutkan bahwa kapur terhidrasi bekerja melalui penguatan ikatan kimia antara agregat dan aspal serta perlambatan proses oksidasi bitumen (Lesueur et al., 2013). Keempat penelitian menggunakan metode uji yang berbeda-beda (ITS untuk TSR dan Marshall untuk stabilitas atau stabilitas sisa), sehingga hasilnya belum dapat dibandingkan secara langsung dalam satu kerangka pengujian yang sama. Meskipun demikian, seluruh penelitian secara konsisten melaporkan bahwa penambahan kapur pada rentang kadar tertentu (10-50% tergantung jenis campuran) mampu meningkatkan kinerja campuran aspal dibandingkan campuran tanpa kapur. Penelitian mendatang perlu mengkaji kombinasi kapur dengan nanomaterial lain (nano karbon, CNT, atau graphene) secara simultan, yang sejauh ini belum banyak dieksplorasi baik pada penelitian nasional maupun internasional.

Berdasarkan kajian terhadap 31 sumber pustaka yang mencakup empat jenis bahan tambah (nano karbon, carbon nanotubes, graphene, dan kapur terhidrasi), dapat disintesis beberapa pola lintas-bahan yang konsisten muncul, sebagaimana dirangkum pada Tabel 5.

Tabel 5 Rekapitulasi Pola Lintas-Bahan Tambah

Aspek	Nano Karbon	CNT	Graphene	Kapur
Jumlah studi dikaji	7	6	5	5
Pola dosis-kinerja	Optimum-turun	Optimum-turun	Optimum-turun	Optimum-turun
Penyebab penurunan performa	Aglomerasi	Aglomerasi	Aglomerasi	Dosis berlebih (mekanisme berbeda)
Karakterisasi mikrostruktur	Ada (sebagian)	Belum ada	Ada (sebagian)	Belum ada

Keseragaman metode uji	Tidak seragam (ITS, Marshall, SEM/FESEM, rut depth)	Seragam (ITS/Marshall)	Seragam (Marshall)	Tidak seragam
------------------------	---	------------------------	--------------------	---------------

Pola pertama yang konsisten muncul di seluruh 23 studi performa (di luar studi review/mekanistik) adalah hubungan dosis-kinerja non-linear: peningkatan kinerja pada dosis rendah-menengah, diikuti penurunan pada dosis tinggi. Pola ini terjadi pada ketiga bahan berbasis karbon (nano karbon, CNT, graphene) akibat aglomerasi partikel, sementara pada kapur penurunan performa pada dosis berlebih lebih disebabkan oleh perubahan sifat mastik yang menjadi terlalu kaku, bukan aglomerasi partikel nano. Perbedaan mekanisme ini penting dicatat karena menunjukkan bahwa "dosis optimum" pada tiap bahan tidak dapat disamaratakan meskipun pola grafiknya serupa.

Pola kedua adalah kesenjangan karakterisasi mikrostruktur: sebagian besar studi yang dikaji berhenti pada parameter makroskopik (ITS, Marshall) tanpa memverifikasi mekanisme interaksi bahan-bitumen secara langsung. Pengecualian ditemukan pada penelitian graphene (Li et al., 2021; Li et al., 2022) yang dilengkapi analisis AFM, serta dua studi internasional nano karbon yang menggunakan SEM (Rafi et al., 2018) dan FESEM (Ahmed & Majid, 2026); karakterisasi ini sepenuhnya berasal dari literatur internasional, sementara seluruh studi nasional pada keempat jenis bahan tambah masih terbatas pada pengujian makroskopik.

Pola ketiga adalah ketidakseragaman metode uji antar-bahan, khususnya pada kapur, yang menyulitkan perbandingan efektivitas antar keempat jenis bahan tambah secara head-to-head. Sebagai indikasi kasar, bahan berbasis karbon (CNT dan nano karbon) melaporkan peningkatan stabilitas dalam rentang 9-25% terhadap kontrol, graphene melaporkan peningkatan hingga 7,19%, sedangkan kapur melaporkan peningkatan ketahanan kelembapan hingga 78,6%, perbandingan ini bersifat indikatif karena parameter dan kondisi pengujian antar-studi berbeda-beda, sehingga tidak dapat disimpulkan bahan mana yang "paling efektif" tanpa penelitian lanjutan yang menyeragamkan metode uji.

4. PENUTUP

Berdasarkan hasil kajian literatur mengenai penambahan nanomaterial dan kapur pada campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC)*, dapat disimpulkan bahwa penambahan nano karbon, *Carbon Nanotubes (CNT)*, dan *graphene* berpotensi meningkatkan kinerja campuran, terutama terhadap kekuatan tarik dan stabilitas. Peningkatan tersebut umumnya terjadi hingga mencapai kadar optimum tertentu. Penggunaan nanomaterial dalam kadar yang berlebihan dapat menyebabkan aglomerasi partikel sehingga efektivitas bahan tambah menurun dan kinerja campuran dapat mengalami penurunan. Penambahan kapur juga menunjukkan pengaruh positif terhadap ketahanan campuran aspal terhadap kerusakan akibat kelembapan. Beberapa penelitian menunjukkan peningkatan nilai *Tensile Strength Ratio (TSR)* dan stabilitas sisa pada kadar kapur tertentu. Namun, hasil antarpemelitian belum dapat dibandingkan secara langsung karena terdapat perbedaan jenis bahan, kadar penambahan, serta metode pengujian yang digunakan. Secara keseluruhan, nanomaterial dan kapur memiliki potensi sebagai bahan tambah untuk meningkatkan kinerja campuran AC-WC. Namun, penelitian lanjutan masih diperlukan melalui pengujian laboratorium dengan metode dan parameter yang seragam, khususnya untuk mengkaji kombinasi kapur dengan nano karbon, CNT, atau graphene

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta, yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan dan penyelesaian penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Sri Sunarjono selaku dosen pembimbing atas arahan, bimbingan, dan masukan selama penyusunan Tugas Akhir.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, M. T. H. I., Heyanto, Saparwi, & Robert. (2025). Inovasi Penggunaan Kapur sebagai Pengganti Bahan Pengisi pada AC-WC. *Jurnal Sosial Teknologi*, 5(7), 2970. <https://doi.org/10.59188/jurnalsostech.v5i7.32340>
- Ahmed, S. A., & Majid, H. M. (2026). Study the behavior of asphalt cement modified by different types of nanocarbons. *Civil Engineering Journal*, 12(4), 1367–1378. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2026-012-04-07>
- Akbar, S. J., Maizuar, Muthmainnah, Ersas, N. S., Desmi, A., Arfiandi, J., Adha, R., & Putri, D. L. (2025). The Effect of Carbon Nanotubes on the Marshall Characteristics of AC-WC Asphalt Mixture. *International Journal of Engineering, Science and Information Technology*, 5(1), 215–220. <https://doi.org/10.52088/ijesty.v5i1.690>
- Al-Marafi, M. N. (2021). Effects of Hydrated Lime on Moisture Susceptibility of Asphalt Concrete. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 15(2), 13–17. <https://doi.org/10.12913/22998624/135585>
- Aljbouri, H. J., & Albayati, A. H. (2023). Effect of nanomaterials on the durability of hot mix asphalt. *Transportation Engineering*, 11, 100165. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100165>
- Annura, S., Hamzani, Maulai, E., & Burhanuddin. (2024). Pengaruh Penambahan Graphene Sebagai Bahan Tambah Aspal Terhadap Kinerja Campuran AC-WC. *SISFO: Jurnal Ilmiah Sistem Informasi*, 8(1), 161–181.
- Bhargava, S., Raghuwanshi, A. K., & Gupta, P. (2016). Nanomaterial Compatibility and Effect on Properties of Base Bitumen Binder and Polymer Modified Bitumen. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 3(6), 276–282.
- Du, Y., Chen, J., Han, Z., & Liu, W. (2018). A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test methods. *Construction and Building Materials*, 168, 893–905. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.151>
- Eisa, M. S., Mohamady, A., Basiouny, M. E., Abdulhamid, A., & Kim, J. R. (2022). Mechanical properties of asphalt concrete modified with carbon nanotubes (CNTs). *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00930. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00930>
- Ezzat, E. N., Al-Saadi, I. F., & Jasim, A. F. (2023). Effect of Multiple-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) on Asphalt Binder Rheological Properties and Performance. *Advances in Civil Engineering*, 2023, 3248035. <https://doi.org/10.1155/2023/3248035>
- Haq, M. F. U., Ahmad, N., Nasir, M. A., Jamal, Hafeez, M., Rafi, J., Zaidi, S. B. A., & Haroon, W. (2018). Carbon Nanotubes (CNTs) in Asphalt Binder: Homogeneous Dispersion and Performance Enhancement. *Applied Sciences*, 8(12), 1–19. <https://doi.org/10.3390/app8122651>
- Hidayat, A., Setiadji, S., & Hadisantoso, E. P. (2019). Sintesis Oksida Grafena Tereduksi (rGO) dari Arang Tempurung Kelapa (Cocos nucifera). *Alkimiya*, 5(2), 68–73. <https://doi.org/10.15575/ak.v5i2.3810>
- Iftikhar, S., Shah, P. M., & Mir, M. S. (2022). Potential Application of Various Nanomaterials on the Performance of Asphalt Binders and Mixtures: A Comprehensive Review.

- Is Dayanti, R., Irwansyah, I., & Alamsyah, W. (2024). Abu Batu Kapur Sebagai Alternatif Filler dalam Campuran Aspal Beton untuk Lapisan Aus. *Jurnal Ilmiah Telsinas Elektro, Sipil Dan Teknik Informasi*, 7(1), 65–73. <https://doi.org/10.38043/telsinas.v7i1.5096>
- Lesueur, D., Petit, J., & Ritter, H.-J. (2013). The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: A state-of-the-art review. *Road Materials and Pavement Design*, 14(1), 1–16. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.743669>
- Li, C., Fan, Z., Wu, S., Li, Y., Gan, Y., & Zhang, A. (2018). Effect of carbon black nanoparticles from the pyrolysis of discarded tires on the performance of asphalt and its mixtures. *Applied Sciences*, 8(4), 624. <https://doi.org/10.3390/app8040624>
- Li, S., Xu, W., Zhang, F., Wu, H., & Zhao, P. (2022). Effect of Graphene Oxide on the Low-Temperature Crack Resistance of Polyurethane-SBS-Modified Asphalt and Asphalt Mixtures. *Polymers*, 14(3), 453. <https://doi.org/10.3390/polym14030453>
- Li, X., Wang, Y. M., Wu, Y. L., Wang, H. R., Chen, M., Sun, H. D., & Fan, L. (2021). Properties and modification mechanism of asphalt with graphene as modifier. *Construction and Building Materials*, 272, 121919. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121919>
- Little, D. N., & Petersen, J. C. (2005). Unique Effects of Hydrated Lime Filler on the Performance-Related Properties of Asphalt Cements: Physical and Chemical Interactions Revisited. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(2), 207–218. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:2\(207\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:2(207))
- Nasution, N. F., Maizuar, M., Akbar, S. J., Usrina, N., & Burhanuddin, B. (2025). The Effect Of Compaction Temperature On Marshall Parameters Of AC-WC Asphalt Mixtures With Graphene Additives. *Journal of Planning and Research in Civil Engineering*, 4(3), 670–683. <https://doi.org/10.55616/prince.v4i3.1049>
- Padallingan, O., Kamba, C., & Apriyani, I. (2024). Pemanfaatan Kapur Padam Sebagai Substitusi Filler Pada Campuran AC-BC Menggunakan Agregat Sungai Salu Kula. *Paulus Civil Engineering Journal*, 6(3), 519–527.
- Pujatmoko, R., & Sunarjono, S. (2023). Marshall And Durability Analysis of Asphalt Concrete. *Eprints UMS*, 1–19.
- Rahmawati, A., & Sunarjono, S. (2023). *Analisis karakteristik ITS dan durabilitas campuran AC-WC menggunakan aspal nano karbon* (Naskah publikasi, Universitas Muhammadiyah Surakarta). UMS Institutional Repository. <https://eprints.ums.ac.id/123137/>
- Rasheed, S. S., Mohammed, A. F., Sattar, R. J., & Joni, H. H. (2025). Enhancing recycled asphalt mixture using asphalt modified with nano-carbon. *Petroleum Chemistry*, 65(9), 1046–1056. <https://doi.org/10.1134/S0965544125050019>
- Shams, M. K., Hilal, M. M., Fattah, M. Y., & Hafez, M. (2025). Effects of Carbon Nanotubes on Asphalt Binder Rheology and Wearing Course Mixes. *Civil Engineering Journal*, 11(9), 3887–3900. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-09-020>
- Suciati, H., Simamora, A. W., Panusunan, P., & Fauzan, F. (2023). Analisa Campuran CPHMA terhadap Penambahan Variasi Aspal Penetrasi 60/70 pada Karakteristik Marshall. *Jurnal Teknologi Riset Terapan*, 1(2), 75–86.
- Sukirman, S. (2010). *Perencanaan Tebal Struktur Perkerasan Lentur*. Nova.
- Zahedi, M., Barati, M., & Zarei, M. (2017). Evaluation the Effect of Carbon Nanotube on the Rheological and Mechanical Properties of Bitumen and Hot Mix Asphalt (HMA). *Electronic Journal of Structural Engineering*, 17. <https://doi.org/10.56748/ejse.17221>
- Zarei, M., Naseri, A., Salehikalam, A., Ghandehari, M., Nasrollahi, M., & Dadashi, A. (2022). Technical-economic studies about the effect of Nano-carbon black on asphalt mixtures. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 22(2), 33–41. <https://doi.org/10.56748/ejse.223212>

Zulkarnain, I., & Hidayat, M. (2023). Pengaruh Penggunaan Kapur Sebagai Penambahan Filler Pada Campuran Aspal AC-BC. *Journal of Civil Engineering Building and Transportation*, 7(1), 239–251. <https://doi.org/10.31289/jcebt.v7i1.9124>

