



Pengaruh Komposisi Nanosilika Terhadap Kinerja Mekanik Aspal Hibrida Berbasis Mikroorganisme

Muhamad Khalid Khadafi^{1*}, Ratnawulan², Riri Jonuarti³, Syafri⁴

¹⁻⁴ Universitas Negeri Padang, Indonesia
email: khalidkhadafi16@gmail.com¹

Article Info :

Received:
27-02-2026
Revised:
23-03-2026
Accepted:
13-04-2026

Abstract

The decline in pavement performance due to increasing traffic loads necessitates the development of advanced materials beyond conventional asphalt mixtures. This study investigates the effect of nanosilica composition on the mechanical performance of hybrid Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) modified with Escherichia coli as a biomineralization agent. The mixture was prepared using a fixed asphalt content of 6% and nanosilica variations of 0%, 3%, 5%, and 9% by asphalt weight, combined with bacterial concentration of 10^3 cells/mL. Marshall testing was conducted in accordance with Bina Marga 2018 Revision 2 specifications. The results indicate that nanosilica addition leads to a gradual decrease in density from 2.472 to 2.453 g/cm³, while significantly increasing stability from 1,094 kg to 1,560 kg. Flow values ranged between 3.90 and 4.20 mm, with higher compositions exceeding specification limits. The 5% nanosilica composition demonstrated the most balanced performance across all parameters. The synergistic interaction between nanosilica and bacterial activity enhances interparticle bonding, offering a promising approach for developing durable and sustainable asphalt materials.

Keywords: Nanosilica, Asphalt Hybrid, Escherichia Coli, Marshall Stability, Mechanical Performance.

Abstrak

Penurunan kinerja perkerasan akibat meningkatnya beban lalu lintas mengharuskan pengembangan bahan-bahan canggih yang melampaui campuran aspal konvensional. Penelitian ini mengkaji pengaruh komposisi nanosilika terhadap kinerja mekanis campuran hibrida Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) yang dimodifikasi dengan Escherichia coli sebagai agen biomineralisasi. Campuran disiapkan dengan menggunakan kandungan aspal tetap sebesar 6% dan variasi nanosilika sebesar 0%, 3%, 5%, dan 9% berdasarkan berat aspal, dikombinasikan dengan konsentrasi bakteri sebesar 10^3 sel/mL. Uji Marshall dilakukan sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Hasil menunjukkan bahwa penambahan nanosilika menyebabkan penurunan densitas secara bertahap dari 2,472 menjadi 2,453 g/cm³, sementara stabilitas meningkat secara signifikan dari 1.094 kg menjadi 1.560 kg. Nilai aliran berkisar antara 3,90 dan 4,20 mm, dengan komposisi yang lebih tinggi melebihi batas spesifikasi. Komposisi nanosilika 5% menunjukkan kinerja paling seimbang di seluruh parameter. Interaksi sinergis antara nanosilika dan aktivitas bakteri meningkatkan ikatan antarpartikel, menawarkan pendekatan yang menjanjikan untuk mengembangkan bahan aspal yang tahan lama dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Nanosilika, Aspal Hibrida, Escherichia Coli, Stabilitas Marshall, Kinerja Mekanis



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Perkembangan mutakhir dalam rekayasa material perkerasan jalan menunjukkan pergeseran paradigma dari pendekatan konvensional menuju integrasi nanoteknologi dan bioteknologi sebagai respons terhadap meningkatnya beban lalu lintas, tekanan lingkungan, serta tuntutan keberlanjutan infrastruktur global. Dalam lanskap ini, material aspal tidak lagi dipandang sebagai sistem pasif, melainkan sebagai medium rekayasa fungsional yang dapat dimodifikasi secara multi-skala untuk meningkatkan kinerja mekanis sekaligus memberikan nilai tambah lingkungan. Studi terkini menyoroti potensi material nano, khususnya nanosilika, dalam memperbaiki karakteristik viskoelastis dan ketahanan deformasi campuran aspal, sekaligus membuka ruang bagi integrasi agen biologis yang mampu berperan dalam mekanisme self-healing dan biomineralisasi (Kumar & Singh, 2023; Park,

2022; Mousavi Rad et al., 2023). Konvergensi antara nanomaterial dan mikroorganisme ini merepresentasikan frontier baru dalam inovasi material jalan yang tidak hanya berorientasi pada kekuatan struktural, tetapi juga adaptivitas dan keberlanjutan sistem.

Penelitian terdahulu secara konsisten menunjukkan bahwa nanosilika memiliki kemampuan signifikan dalam meningkatkan stabilitas dan kekuatan mekanik material berbasis semen maupun aspal melalui mekanisme pengisian pori mikro, peningkatan luas permukaan reaktif, serta penguatan ikatan antar fase material (Garcia, 2024; Kumar & Singh, 2023). Dalam konteks campuran aspal, nanosilika dilaporkan mampu meningkatkan resistensi terhadap deformasi permanen dan meningkatkan stabilitas Marshall melalui interaksi fisikokimia antara binder dan agregat (Park, 2022). Di sisi lain, pendekatan bioteknologi melalui pemanfaatan mikroorganisme memperlihatkan potensi yang tidak kalah signifikan, terutama melalui proses biomineralisasi yang menghasilkan deposisi mineral dan biofilm sebagai pengikat tambahan dalam struktur material (DeJong, 2022). Bahkan, studi biophysical menunjukkan bahwa struktur sel bakteri seperti *Escherichia coli* memiliki karakteristik mekanik yang memungkinkan kontribusi terhadap stabilisasi mikrostruktur material melalui interaksi antar partikel (Tuson, 2021). Sintesis dari dua pendekatan ini mengindikasikan adanya peluang sinergis yang belum sepenuhnya dieksplorasi dalam sistem material hibrida.

Meskipun demikian, literatur yang ada masih menunjukkan keterbatasan konseptual dan empiris yang signifikan, terutama terkait integrasi simultan antara nanosilika dan agen biologis dalam satu sistem campuran aspal. Sebagian besar penelitian cenderung memisahkan kajian nanomodifikasi dan biomodifikasi, sehingga interaksi kompleks antara kedua komponen tersebut belum dipahami secara komprehensif. Inkonsistensi hasil juga muncul dalam penentuan kadar optimum nanosilika, di mana peningkatan kadar tertentu justru menyebabkan aglomerasi partikel yang berpotensi menurunkan homogenitas campuran dan memengaruhi parameter seperti density dan flow (Garcia, 2024; Kumar & Singh, 2023). Sementara itu, penelitian terkait biomineralisasi dalam material konstruksi masih didominasi oleh sistem berbasis semen, sehingga transfer pengetahuan ke sistem aspal yang bersifat viskoelastis masih menyisakan celah konseptual yang signifikan (DeJong, 2022). Ketiadaan kerangka eksperimental yang menguji interaksi keduanya secara simultan dalam parameter mekanik utama mempertegas adanya gap penelitian yang belum terjawab.

Urgensi untuk mengisi celah tersebut semakin menguat ketika mempertimbangkan implikasi praktis terhadap performa dan umur layanan perkerasan jalan, khususnya dalam kondisi lalu lintas berat dan lingkungan ekstrem. Penurunan density, ketidakstabilan struktural, serta ketidakseimbangan nilai flow dapat berdampak langsung pada kegagalan dini perkerasan, yang pada akhirnya meningkatkan biaya pemeliharaan dan menurunkan efisiensi infrastruktur. Studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa pendekatan nanomodifikasi dapat meningkatkan performa mekanik, sementara pendekatan biologis berpotensi memberikan mekanisme perbaikan internal material (Mousavi Rad et al., 2023; Park, 2022). Namun, tanpa pemahaman yang terintegrasi mengenai bagaimana variasi komposisi nanosilika berinteraksi dengan aktivitas biomineralisasi mikroorganisme, potensi sinergi tersebut tidak dapat dimanfaatkan secara optimal dalam aplikasi nyata.

Dalam konteks tersebut, penelitian ini menempati posisi strategis dengan mengusulkan pendekatan hibrida yang mengintegrasikan nanosilika sebagai agen penguat anorganik dan bakteri *Escherichia coli* sebagai agen biomineralisasi dalam satu sistem campuran aspal AC-WC. Pendekatan ini tidak hanya memperluas cakupan studi nanoteknologi dalam material jalan, tetapi juga mengintroduksi dimensi bioteknologi yang relatif baru dalam rekayasa aspal. Fokus pada variasi komposisi nanosilika dalam sistem yang telah dimodifikasi secara biologis memungkinkan eksplorasi hubungan sebab-akibat yang lebih kompleks antara struktur mikro dan performa makroskopik material, khususnya dalam parameter density, stabilitas, dan flow sebagai indikator utama kinerja mekanik campuran.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara sistematis pengaruh variasi komposisi nanosilika terhadap kinerja mekanik aspal hibrida berbasis mikroorganisme, dengan menekankan pada identifikasi komposisi optimum yang mampu menghasilkan keseimbangan antara kepadatan, stabilitas struktural, dan deformabilitas material. Kontribusi teoretis penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka konseptual integratif yang menghubungkan mekanisme nanomodifikasi dan biomineralisasi dalam satu sistem material, sementara kontribusi metodologis diwujudkan melalui desain eksperimen kuantitatif berbasis uji Marshall yang mampu menangkap dinamika interaksi kedua variabel tersebut secara terukur dan komparatif.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi **empiris** berbasis eksperimen laboratorium dengan pendekatan kuantitatif yang dirancang untuk menguji secara sistematis interaksi antara nanosilika dan mikroorganisme dalam sistem aspal hibrida. Proses pengembangan inovasi dimulai dengan formulasi campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) menggunakan aspal Pen 60/70 dan agregat yang memenuhi standar Bina Marga, dengan kadar aspal dikontrol konstan sebesar 6% terhadap total campuran untuk memastikan isolasi pengaruh variabel bebas. Variasi utama yang diinvestigasi meliputi komposisi nanosilika sebesar 0%, 3%, 5%, dan 9% terhadap berat aspal, yang dikombinasikan dengan bakteri *Escherichia coli* pada konsentrasi 10^3 cells/mL sebagai agen biomineralisasi. Tahapan eksperimen dilakukan secara berurutan melalui pemanasan binder, pencampuran dengan agregat, serta pemadatan menggunakan Marshall Compactor pada suhu 190°C untuk mencapai kondisi densifikasi optimal. Nanosilika diaplikasikan melalui metode *dry blending* guna memastikan distribusi partikel yang merata dalam matriks agregat, sementara inokulasi bakteri dilakukan setelah suhu campuran turun di bawah 40°C untuk mempertahankan viabilitas biologis dan memungkinkan pembentukan biofilm dalam struktur mikro campuran. Desain metodologis ini menonjol karena mengintegrasikan pendekatan nanoteknologi dan bioteknologi dalam satu sistem eksperimen yang terkontrol, sehingga memungkinkan eksplorasi mekanisme sinergis yang jarang dikaji dalam literatur.

Validasi kinerja mekanik campuran dilakukan menggunakan pengujian Marshall yang mengacu secara ketat pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 sebagai standar referensi, sehingga menjamin relevansi praktis dan komparabilitas hasil. Parameter evaluasi utama mencakup density (g/cm^3) sebagai indikator kepadatan struktural, stabilitas Marshall (kg) sebagai representasi kapasitas menahan beban, serta flow (mm) sebagai ukuran deformabilitas plastis campuran. Setiap variasi komposisi diuji secara komparatif terhadap sampel kontrol untuk mengidentifikasi perubahan kinerja yang dihasilkan oleh intervensi nanosilika dan aktivitas biomineralisasi. Ketahanan metodologis diperkuat melalui konsistensi prosedur pencampuran, kontrol suhu yang presisi, serta pendekatan kuantitatif yang memungkinkan analisis hubungan sebab-akibat secara terukur antar variabel. Evaluasi dilakukan tidak hanya berdasarkan pemenuhan ambang batas spesifikasi teknis, tetapi juga melalui analisis keseimbangan antar parameter untuk menentukan komposisi optimum yang mampu memaksimalkan stabilitas tanpa mengorbankan kepadatan dan fleksibilitas material, sehingga menghasilkan kerangka evaluasi yang lebih komprehensif dibandingkan pendekatan konvensional yang cenderung parsial.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Perubahan Density Campuran Aspal Hibrida Termodifikasi Nanosilika

Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi komposisi nanosilika menghasilkan tren penurunan nilai density yang bersifat gradual dan konsisten pada seluruh variasi campuran. Nilai density tertinggi tercatat pada campuran kontrol sebesar $2,472 \text{ g/cm}^3$, kemudian menurun menjadi $2,463 \text{ g/cm}^3$, $2,461 \text{ g/cm}^3$, dan $2,453 \text{ g/cm}^3$ masing-masing pada kadar nanosilika 3%, 5%, dan 9%. Fenomena ini mengindikasikan bahwa penambahan nanosilika dalam sistem aspal tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kepadatan struktural material. Studi sebelumnya mengaitkan fenomena tersebut dengan kecenderungan aglomerasi partikel nano yang dapat menghambat distribusi homogen dalam matriks agregat (Garcia, 2024).

Penurunan density yang relatif kecil antar variasi menunjukkan bahwa nanosilika tetap berperan dalam mempertahankan integritas struktur campuran meskipun terjadi perubahan mikrostruktur. Selisih antar nilai density yang tidak signifikan mengindikasikan bahwa sistem campuran masih berada dalam kondisi stabil secara volumetrik. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh nanosilika lebih dominan pada aspek ikatan antar partikel dibandingkan pada peningkatan kepadatan total campuran. Penelitian oleh Liu et al. (2025) menegaskan bahwa interaksi nanosilika lebih berfokus pada peningkatan adhesi dan kohesi dibandingkan densifikasi.

Karakteristik penurunan density juga dapat dikaitkan dengan peningkatan luas permukaan spesifik nanosilika yang menyebabkan kebutuhan ruang antar partikel meningkat. Kondisi ini mengarah pada terbentuknya mikrovoid yang lebih kompleks dalam struktur campuran. Namun, mikrovoid tersebut tidak serta-merta menurunkan performa mekanik karena dapat berperan sebagai ruang adaptif

terhadap deformasi. Temuan ini selaras dengan penelitian Xie et al. (2024) yang menunjukkan bahwa struktur mikro yang lebih kompleks dapat meningkatkan fleksibilitas material.

Distribusi nanosilika dalam campuran melalui metode dry blending berkontribusi terhadap variasi homogenitas material yang dihasilkan. Pada kadar rendah, nanosilika cenderung terdistribusi lebih merata sehingga tidak mengganggu struktur agregat. Namun pada kadar tinggi, potensi aglomerasi meningkat sehingga menyebabkan distribusi yang kurang optimal. Hal ini menjelaskan mengapa penurunan density menjadi lebih terlihat pada kadar 9%. Studi oleh Pote et al. (2024) mengonfirmasi bahwa struktur nanopartikel sangat dipengaruhi oleh kondisi pencampuran.

Peran bakteri *Escherichia coli* dalam sistem ini tidak secara langsung meningkatkan density, tetapi berkontribusi pada stabilisasi mikrostruktur melalui pembentukan biofilm. Biofilm tersebut berfungsi sebagai pengikat tambahan yang mengisi celah antar partikel tanpa meningkatkan massa jenis secara signifikan. Interaksi ini menciptakan struktur yang lebih kohesif meskipun density mengalami penurunan. DeJong (2022) menjelaskan bahwa biomineralisasi lebih berpengaruh pada penguatan ikatan dibandingkan densifikasi material.

Kondisi ini memperlihatkan bahwa parameter density tidak dapat diinterpretasikan secara terpisah dari parameter mekanik lainnya. Penurunan density dalam konteks ini tidak mengindikasikan degradasi performa, melainkan perubahan karakteristik struktural yang bersifat adaptif. Evaluasi harus dilakukan secara komprehensif dengan mempertimbangkan stabilitas dan flow sebagai indikator tambahan. Pendekatan ini sejalan dengan konsep material fungsional yang menekankan keseimbangan performa (Ramadan & Ali, 2025).

Tabel 1. Hasil Pengujian Density Campuran Aspal Hibrida AC-WC dengan Variasi Nanosilika

Nanosilika (%)	Density (g/cm ³)
0% (Kontrol)	2,472
3%	2,463
5%	2,461
9%	2,453

Sumber: Data hasil pengujian laboratorium penelitian ini.

Data pada Tabel 1 memperlihatkan tren penurunan density yang linear terhadap peningkatan kadar nanosilika. Penurunan tersebut menunjukkan hubungan negatif antara komposisi nanosilika dan kepadatan campuran. Interpretasi ini mengindikasikan bahwa peningkatan kadar nanosilika harus dikontrol untuk menghindari efek aglomerasi. Hasil ini konsisten dengan temuan Taheri et al. (2026) yang menunjukkan adanya batas optimum penggunaan nanosilika.

Pada kadar 3% dan 5%, penurunan density masih berada dalam rentang yang dapat diterima tanpa mengganggu stabilitas struktural. Hal ini menunjukkan bahwa nanosilika pada kadar moderat masih mampu meningkatkan kualitas campuran tanpa menurunkan kepadatan secara signifikan. Kondisi tersebut mencerminkan keseimbangan antara distribusi partikel dan pengisian rongga. Jahromi et al. (2025) menunjukkan bahwa nanosilika aerogel pada kadar tertentu mampu menjaga stabilitas volumetrik.

Pada kadar 9%, penurunan density menjadi lebih jelas meskipun masih dalam batas toleransi. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan nanosilika berlebih dapat mengurangi efisiensi pengisian rongga antar agregat. Fenomena ini mempertegas pentingnya optimasi komposisi dalam desain campuran. Babagoli et al. (2023) menyatakan bahwa rasio nanosilika yang tidak optimal dapat mengganggu keseimbangan mikrostruktur.

Dari perspektif rekayasa material, penurunan density yang terkendali dapat memberikan keuntungan dalam meningkatkan fleksibilitas campuran. Struktur yang tidak terlalu padat memungkinkan material beradaptasi terhadap beban dinamis tanpa mengalami retak awal. Hal ini relevan dalam konteks perkerasan jalan dengan beban lalu lintas tinggi. Muthaher et al. (2025) menunjukkan bahwa fleksibilitas material berkontribusi terhadap umur layanan perkerasan.

Pengaruh nanosilika terhadap density juga berkaitan dengan sifat reologi binder yang mengalami modifikasi. Interaksi antara nanosilika dan aspal menghasilkan perubahan viskositas yang memengaruhi distribusi material dalam campuran. Efek ini menjadi lebih kompleks dengan adanya

mikroorganisme yang turut berinteraksi dalam sistem. Rasheed et al. (2022) mengungkapkan bahwa nanosilika dapat mengubah sifat aliran aspal secara signifikan.

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa perubahan density tidak berdiri sendiri, melainkan merupakan bagian dari sistem interaksi multi-variabel dalam campuran. Kombinasi nanosilika dan bakteri menciptakan dinamika baru dalam struktur material yang tidak ditemukan pada aspal konvensional. Hal ini menegaskan bahwa pendekatan hibrida memiliki karakteristik unik yang perlu dikaji secara komprehensif. Lubis & Putri (2024) menekankan pentingnya integrasi teknologi nano dalam konstruksi berkelanjutan.

Implikasi praktis dari temuan ini adalah perlunya pengendalian dosis nanosilika dalam implementasi lapangan. Penggunaan nanosilika yang berlebihan tidak memberikan keuntungan tambahan pada density, bahkan berpotensi menurunkan performa struktural. Strategi optimasi menjadi kunci dalam memanfaatkan potensi material nano secara efektif. Swilam et al. (2024) menekankan bahwa desain campuran berbasis nano memerlukan pendekatan presisi.

Karakteristik perubahan density menunjukkan bahwa nanosilika berperan sebagai agen modifikasi yang lebih dominan pada aspek mikrostruktur dibandingkan densitas makro. Penurunan yang terjadi bersifat terkontrol dan tidak mengindikasikan kegagalan material. Hal ini memperkuat argumen bahwa parameter density harus dianalisis dalam konteks sistem yang lebih luas. Feng et al. (2024) menegaskan pentingnya pendekatan multi-parameter dalam evaluasi material konstruksi.

Pengaruh Variasi Komposisi Nanosilika terhadap Stabilitas Marshall Campuran Aspal Hibrida

Kinerja stabilitas Marshall dalam sistem aspal hibrida menunjukkan sensitivitas yang tinggi terhadap intervensi nanosilika, terutama ketika dikombinasikan dengan mekanisme biomineralisasi berbasis mikroorganisme. Stabilitas dipahami sebagai indikator kapasitas campuran dalam menahan deformasi akibat beban lalu lintas, sehingga perubahan nilainya merepresentasikan transformasi struktural pada skala mikro hingga makro. Integrasi partikel nanosilika berpotensi memperkuat matriks pengikat melalui peningkatan adhesi antara binder dan agregat, yang secara teoritis telah dibuktikan dalam sistem material berbasis silika (Kumar & Singh, 2023). Dalam konteks ini, kontribusi biologis dari *Escherichia coli* memperkenalkan dimensi tambahan berupa pembentukan biofilm yang memodifikasi interaksi antar partikel secara dinamis (DeJong, 2022).

Data eksperimental menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada nilai stabilitas seiring dengan bertambahnya kadar nanosilika dalam campuran. Tren ini mencerminkan adanya hubungan non-linear antara fraksi nanosilika dan kapasitas menahan beban, yang mengindikasikan bahwa penguatan struktural tidak hanya bergantung pada kuantitas tetapi juga distribusi partikel dalam matriks. Studi terdahulu mengonfirmasi bahwa nanosilika mampu meningkatkan kekakuan dan ketahanan terhadap deformasi melalui mekanisme pengisian pori dan peningkatan kohesi internal (Babagoli et al., 2023). Interaksi tersebut semakin kompleks ketika dikombinasikan dengan agen biomineralisasi yang memperkuat struktur melalui deposisi mineral mikrobial (Tuson, 2021).

Fenomena peningkatan stabilitas ini tidak dapat dilepaskan dari karakteristik fisikokimia nanosilika yang memiliki luas permukaan tinggi dan reaktivitas yang signifikan. Partikel nanosilika berperan sebagai pengisi aktif yang meningkatkan densitas kontak antar agregat dan binder, sehingga menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata di dalam struktur campuran (Garcia, 2024). Penelitian berbasis simulasi molekuler menunjukkan bahwa nanosilika mampu meningkatkan energi ikatan antar molekul dalam sistem aspal, yang berimplikasi pada peningkatan stabilitas makroskopik (Liu et al., 2025). Kontribusi ini memperkuat asumsi bahwa modifikasi nanosilika berfungsi sebagai penguat struktural yang efektif dalam sistem komposit aspal.

Selain itu, peran mikroorganisme dalam sistem ini tidak bersifat pasif, melainkan aktif dalam membentuk jaringan pengikat tambahan melalui produksi biofilm. Biofilm yang dihasilkan oleh *E. coli* mampu mengisi celah mikro dan meningkatkan kohesi antar partikel, sehingga memperkuat struktur internal campuran (DeJong, 2022). Sifat mekanik sel bakteri yang elastis juga memungkinkan distribusi tegangan yang lebih adaptif terhadap beban eksternal (Tuson, 2021). Kombinasi antara nanosilika dan aktivitas biologis ini menghasilkan sistem hibrida yang memiliki karakteristik mekanik yang lebih kompleks dibandingkan campuran konvensional.

Validasi kuantitatif terhadap fenomena tersebut ditunjukkan melalui hasil pengujian Marshall yang disajikan dalam Tabel 2. Nilai stabilitas meningkat secara konsisten dari kondisi kontrol hingga variasi kadar nanosilika tertinggi, yang mengindikasikan efektivitas modifikasi material dalam

meningkatkan performa mekanik. Peningkatan ini melampaui ambang batas minimum spesifikasi teknis, sehingga menunjukkan relevansi praktis dalam aplikasi lapangan. Interpretasi terhadap data ini menuntut analisis yang tidak hanya deskriptif tetapi juga mekanistik untuk memahami interaksi antar komponen dalam sistem.

Tabel 2. Nilai Stabilitas Marshall Campuran Aspal Hibrida dengan Variasi Nanosilika

Nanosilika (%)	Stabilitas (Kg)	Persentase Peningkatan (%)
0% (Kontrol)	1.094	–
3%	1.420	29,8
5%	1.480	35,2
9%	1.560	42,6

Sumber: Data hasil penelitian (2026).

Analisis terhadap Tabel 2 menunjukkan bahwa peningkatan stabilitas tidak bersifat linier sempurna, melainkan menunjukkan kecenderungan peningkatan yang semakin melambat pada kadar yang lebih tinggi. Hal ini mengindikasikan adanya batas efektivitas nanosilika dalam memperkuat struktur, yang kemungkinan dipengaruhi oleh fenomena aglomerasi partikel pada konsentrasi tinggi. Studi eksperimental lain juga melaporkan bahwa kelebihan nanosilika dapat menyebabkan distribusi yang tidak merata dan menurunkan efisiensi penguatan (Feng et al., 2024). Kondisi ini menegaskan pentingnya optimasi komposisi dalam sistem berbasis nanomaterial.

Dari perspektif rekayasa material, peningkatan stabilitas yang signifikan mencerminkan peningkatan kemampuan campuran dalam menahan deformasi plastis akibat beban berulang. Hal ini sejalan dengan temuan bahwa nanosilika dapat meningkatkan modulus elastis dan ketahanan terhadap rutting pada campuran aspal (Ghaffari & Sarkar, 2025). Integrasi nanosilika juga terbukti meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi, yang merupakan faktor kritis dalam performa perkerasan jalan (Jahromi et al., 2025). Kinerja ini memberikan indikasi bahwa sistem aspal hibrida memiliki potensi untuk diaplikasikan pada kondisi lalu lintas berat.

Dalam kerangka yang lebih luas, peningkatan stabilitas ini memiliki implikasi langsung terhadap umur layanan perkerasan jalan. Material dengan stabilitas tinggi cenderung memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap kerusakan struktural, sehingga mengurangi kebutuhan pemeliharaan dan biaya operasional (Muthaher et al., 2025). Studi lain menunjukkan bahwa modifikasi nanosilika dapat meningkatkan ketahanan terhadap retak leleh dan deformasi permanen (Rasheed et al., 2022). Hal ini memperkuat relevansi penggunaan nanosilika dalam pengembangan material konstruksi berkelanjutan.

Namun demikian, peningkatan stabilitas yang berlebihan juga berpotensi menimbulkan konsekuensi terhadap fleksibilitas material. Material yang terlalu kaku cenderung rentan terhadap retak akibat beban dinamis dan perubahan suhu (Sabry et al., 2025). Oleh karena itu, keseimbangan antara kekuatan dan fleksibilitas menjadi aspek penting dalam desain campuran aspal. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip rekayasa material yang menekankan optimasi multi-parameter dalam sistem komposit.

Kontribusi penelitian ini terletak pada integrasi pendekatan nanoteknologi dan bioteknologi dalam meningkatkan stabilitas mekanik campuran aspal. Kombinasi nanosilika dan mikroorganisme menghasilkan efek sinergis yang tidak hanya meningkatkan kekuatan tetapi juga memperkenalkan mekanisme penguatan baru berbasis biomineralisasi. Pendekatan ini memperluas paradigma dalam rekayasa material jalan yang selama ini didominasi oleh modifikasi kimia dan fisik (Ramadan & Ali, 2025). Dengan demikian, hasil yang diperoleh memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk pengembangan teknologi material inovatif di bidang infrastruktur jalan.

Optimasi Kinerja Mekanik dan Implikasi Rekayasa Campuran Aspal Hibrida Berbasis Nanosilika–Mikroorganisme

Analisis lanjutan difokuskan pada identifikasi komposisi optimum yang mampu menghasilkan keseimbangan kinerja mekanik dalam sistem aspal hibrida berbasis nanosilika dan mikroorganisme. Evaluasi tidak hanya mempertimbangkan peningkatan satu parameter, tetapi juga keterkaitan antar parameter sebagai sistem yang saling memengaruhi secara struktural. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip desain material berkelanjutan yang menekankan optimasi multi-kriteria dalam satu konfigurasi

material (Ramadan & Ali, 2025). Temuan menunjukkan bahwa variasi komposisi menghasilkan respons yang berbeda dalam konteks interaksi mikrostruktur dan performa makroskopik.

Kinerja optimal dalam sistem aspal tidak selalu ditentukan oleh nilai maksimum salah satu parameter, melainkan oleh kombinasi nilai yang berada dalam rentang spesifikasi teknis secara simultan. Perspektif ini didukung oleh pendekatan mekanistik-empiris yang menekankan pentingnya keseimbangan antara kekuatan dan deformabilitas dalam perkerasan jalan (Muthaer et al., 2025). Dalam konteks ini, stabilitas tinggi tanpa kontrol deformasi berpotensi menimbulkan kegagalan struktural jangka panjang. Oleh karena itu, analisis komprehensif diperlukan untuk menentukan konfigurasi material yang paling adaptif terhadap beban lalu lintas dinamis.

Fenomena interaksi antara nanosilika dan mikroorganisme menunjukkan karakteristik non-linear yang dipengaruhi oleh distribusi partikel dan aktivitas biologis dalam matriks aspal. Nanosilika berperan sebagai agen pengisi mikro yang meningkatkan kekompakan struktur, sementara bakteri berkontribusi melalui pembentukan biofilm yang memperkuat kohesi internal (DeJong, 2022). Interaksi ini menghasilkan efek sinergis yang tidak dapat dijelaskan secara linier berdasarkan komposisi semata. Studi sebelumnya juga menunjukkan bahwa kombinasi nanomaterial dengan agen aktif dapat menghasilkan peningkatan performa yang lebih kompleks dibandingkan penggunaan tunggal (Sabry et al., 2025).

Evaluasi terhadap keseimbangan parameter menunjukkan bahwa tidak semua variasi komposisi mampu memenuhi kriteria teknis secara bersamaan. Hal ini mengindikasikan adanya batas optimum dalam penambahan nanosilika sebelum efek negatif mulai muncul, seperti peningkatan deformasi plastis. Temuan ini konsisten dengan laporan bahwa kelebihan nanomaterial dapat menyebabkan aglomerasi dan menurunkan efisiensi struktural (Pote et al., 2024). Dengan demikian, pendekatan optimasi harus mempertimbangkan batas kritis komposisi untuk menjaga integritas material.

Pendekatan komparatif digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kesesuaian setiap variasi terhadap standar teknis yang berlaku. Evaluasi ini dirumuskan dalam bentuk matriks performa yang mengintegrasikan seluruh parameter dalam satu kerangka analisis. Matriks ini memberikan gambaran komprehensif mengenai posisi relatif setiap variasi dalam konteks pemenuhan spesifikasi. Pendekatan serupa telah digunakan dalam studi material komposit untuk menentukan konfigurasi optimal berbasis multi-parameter (Taheri et al., 2026).

Tabel 3. Evaluasi Kesesuaian Kinerja Campuran Aspal Hibrida terhadap Spesifikasi Teknis

Variasi Nanosilika	Kepadatan	Stabilitas	Flow	Status Kesesuaian
0%	Memenuhi	Memenuhi	Memenuhi	Dasar (Kontrol)
3%	Memenuhi	Memenuhi	Memenuhi	Optimal Parsial
5%	Memenuhi	Memenuhi	Memenuhi	Optimal Seimbang
9%	Memenuhi	Memenuhi	Tidak Memenuhi	Over-Modified

Sumber: Data primer hasil pengujian Marshall, diolah (2026).

Tabel tersebut menunjukkan bahwa hanya satu variasi yang memenuhi seluruh parameter secara simultan tanpa deviasi dari standar teknis. Variasi lain menunjukkan kecenderungan over-performance pada satu aspek yang diikuti oleh penurunan pada aspek lainnya. Kondisi ini mencerminkan trade-off inherent dalam sistem material kompleks berbasis nanoteknologi (Kumar & Singh, 2023). Oleh karena itu, pemilihan komposisi harus mempertimbangkan keseimbangan performa, bukan hanya peningkatan maksimum.

Implikasi rekayasa dari temuan ini menunjukkan bahwa integrasi nanosilika dan mikroorganisme dapat diarahkan untuk menghasilkan material adaptif dengan karakteristik yang dapat dikontrol. Pendekatan ini membuka peluang untuk pengembangan material pintar yang mampu merespons kondisi lingkungan dan beban secara dinamis. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa material berbasis nano memiliki potensi untuk meningkatkan umur layanan perkerasan melalui mekanisme penguatan mikrostruktur (Zhang & Li, 2024). Integrasi dengan agen biologis menambah dimensi baru dalam desain material berkelanjutan.

Keterlibatan mikroorganisme dalam sistem ini memberikan kontribusi unik yang membedakan penelitian ini dari pendekatan konvensional. Aktivitas biologis memungkinkan terbentuknya struktur mikro yang lebih kohesif melalui proses biomineralisasi. Mekanisme ini telah terbukti efektif dalam meningkatkan kekuatan material berbasis semen dan tanah (Tuson, 2021). Dalam konteks aspal, kontribusi ini menjadi inovasi yang memperluas cakupan aplikasi bioteknologi dalam rekayasa infrastruktur.

Dari perspektif keberlanjutan, penggunaan nanosilika dan mikroorganisme mendukung pengembangan material ramah lingkungan dengan efisiensi sumber daya yang lebih tinggi. Nanosilika dapat diperoleh dari limbah industri atau biomassa, sementara mikroorganisme merupakan agen alami yang dapat diregenerasi (Lubis & Putri, 2024). Integrasi keduanya menciptakan sistem material yang tidak hanya unggul secara mekanik, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan dampak lingkungan. Pendekatan ini sejalan dengan tren global dalam pengembangan konstruksi berkelanjutan berbasis inovasi material.

Temuan ini juga memberikan dasar bagi pengembangan model prediktif dalam desain campuran aspal berbasis nanoteknologi. Dengan memahami hubungan antara komposisi dan kinerja, model matematis dapat dikembangkan untuk memprediksi performa tanpa perlu eksperimen berulang. Pendekatan ini telah diterapkan dalam studi dinamika molekuler untuk material komposit berbasis nanosilika (Liu et al., 2025). Integrasi data empiris dengan model prediktif akan meningkatkan efisiensi dalam proses desain material.

Optimasi kinerja mekanik dalam aspal hibrida memerlukan pendekatan multidisiplin yang menggabungkan prinsip teknik sipil, nanoteknologi, dan bioteknologi. Kombinasi nanosilika dan mikroorganisme menghasilkan sistem material dengan karakteristik unik yang tidak dapat dicapai melalui pendekatan konvensional. Pendekatan ini memperluas paradigma desain material menuju sistem yang lebih adaptif dan berkelanjutan. Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengeksplorasi skala implementasi dan ketahanan jangka panjang dalam kondisi lapangan (Jahromi et al., 2025).

KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa variasi komposisi nanosilika dalam sistem aspal hibrida berbasis mikroorganisme menghasilkan respons mekanik yang bersifat non-linear dan saling terintegrasi antar parameter, di mana peningkatan kadar nanosilika secara konsisten memperkuat stabilitas Marshall hingga 1.560 kg, namun diikuti penurunan density secara bertahap dari 2,472 menjadi 2,453 g/cm³ serta peningkatan nilai flow hingga melampaui batas spesifikasi pada kadar tertentu. Interaksi sinergis antara nanosilika sebagai penguat mikrostruktur dan bakteri *Escherichia coli* sebagai agen biomineralisasi berkontribusi terhadap peningkatan kohesi internal melalui mekanisme pengisian pori dan pembentukan biofilm, sehingga menghasilkan sistem material dengan karakteristik mekanik yang lebih kompleks dibandingkan campuran konvensional. Evaluasi berbasis keseimbangan parameter menunjukkan bahwa komposisi 5% nanosilika memberikan performa paling optimal karena mampu mempertahankan stabilitas tinggi sekaligus menjaga deformabilitas dan kepadatan dalam rentang spesifikasi teknis. Temuan ini mengindikasikan bahwa pendekatan integratif nanoteknologi dan bioteknologi berpotensi menjadi strategi inovatif dalam pengembangan material perkerasan jalan yang adaptif, efisien, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Babagoli, R., Ameli, A., Salari, S., Hosseinian, S. M., & Ebrahimi Moghaddam, A. (2023). Investigation of the effect of combined nanosilica and iranian natural binder on the rheological behavior of mastics and performance of asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(4), 04023041. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004695](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004695)
- DeJong, J. (2022). Bacterial role in material strengthening and biomineralization. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(5), 1801–1815. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-11789-4>
- Feng, S., Jiang, Y., Lyu, J., Xiao, H., Zhang, Q., Song, R., ... & Ren, Z. (2024). Effect of nanosilica and fiber on mechanical properties and microstructure of recycled coarse aggregates road concrete. *Construction and Building Materials*, 428, 136404. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136404>
- Garcia, M. (2024). Effects of micro- and nanosilica on mechanical properties of mortars. *Materials*, 17(6), 2150–2165. <https://doi.org/10.3390/ma17062150>

- Ghaffari, A., & Sarkar, A. (2025). High-Temperature Performance of Asphalt Binder and Nano Silica-Aerogel Composite. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 37(12), 04025472. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-19551>
- Jahromi, M. N., Sarkar, A., Mansourian, A., & Zaghi, A. E. (2025). Mechanical performance of hot-mix asphalt modified with porous nanosilica aerogels. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 37(1), 04024436. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-18625>
- Kumar, R., & Singh, P. (2023). Modification effects of nanosilica on asphalt binders: A review. *Nanotechnology Reviews*, 12(1), 455–470. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2023-0021>
- Liu, F., Hu, Z., Wang, B., Zhang, C., Huang, L., Wang, H., ... & Lu, F. (2025). Molecular dynamics and experimental investigation on the mechanism and properties of nano-silica/graphene composite-modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 493, 143309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143309>
- Lubis, N. A., & Putri, M. D. (2024). Teknologi Nano Dari Bahan Alam Sebagai Prospek Penerapan Konstruksi Berkelanjutan. *International Journal of Science, Technology and Applications*, 2(2), 102-119. <https://doi.org/10.70115/ijsta.v2i2.232>
- Mousavi Rad, S., Kamboozia, N., Ameri, M., & Mirabdolazimi, S. M. (2023). Feasibility of concurrent improvement of pollutants-absorption ability from surface runoff and mechanical performance of asphalt mixtures by using photocatalytic nanomodified porous asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(8), 04023248. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-14543>
- Muthafer, A. M. M., Suwanto, F., & Putri, D. M. (2025). Mechanistic-Empirical Prediction of Rutting and Fatigue Cracking Life for Porous Asphalt Modified with Nano-Silica (Nano-SiO₂). In *E3S Web of Conferences* (Vol. 674, p. 06003). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202567406003>
- Park, J. (2022). Nano-silica reinforced asphalt mixtures: Performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 345, Article 128321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128321>
- Perdana, M. G., & Mudiyo, R. (2025). Penggunaan Nanosilika Pada Campuran Aspal Berpori Dalam Meningkatkan Kinerja Campuran. *MoDuluS Media Komunikasi Dunia Ilmu Sipil*, 7(1), 98-109. <https://doi.org/10.32585/modulus.v7i1.6307>
- Perdana, M. G., Pratikso, P., & Mudiyo, R. (2024). Nanomaterial Sebagai Bahan Tambah Yang Inovatif Untuk Meningkatkan Kinerja Campuran Aspal Berpori. *Proceeding: Islamic University of Kalimantan*. <https://dx.doi.org/10.31602/piuk.v0i0.17721>
- Pote, L. L., Nadut, A., & Latumakulita, G. (2024). Pengaruh Pelarut terhadap Struktur Nanopartikel Silika dari Limbah Batu Akik. *Jurnal Sains dan Edukasi Sains*, 7(2), 118-127. <https://doi.org/10.24246/juses.v7i2p118-127>
- Ramadan, I. M., & Ali, A. A. (2025). Exploring the Impact of Nanotechnology on Enhancing Asphalt Mix Properties: A Comprehensive Review. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*. <https://doi.org/10.21608/aej.2025.337297.1738>
- Rasheda, S. B., Debnath, B., & Sarkar, D. (2022). Application of nano-silica in rubber modified asphalt mix made with marginal aggregates. *Materials Today: Proceedings*, 65, 669-675. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.261>
- Rasheed, S. S., Joni, H. H., & Al-Rubae, R. H. (2022). Using nano silica to enhance the performance of recycled asphalt mixtures. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 10(4), 32-39. <https://doi.org/10.21533/pen.v10.i4.679>
- Sabry, M. M., G Morsi, A., & Samir Eisa, M. (2025). Effect of Fibers and Nanomaterials individually or in combination on the enhancement of asphalt mixes' performance: A review. *Benha Journal of Applied Sciences*, 10(7), 117-133. <https://doi.org/10.21608/bjas.2025.371876.1658>
- Swandari, T., Laksana, L. P., & Faizah, K. (2026). Nanosilika Sekam Padi Memodifikasi Anatomi Akar dan Meningkatkan Panjang Akar Planlet Anggrek *Dendrobium* sp. In Vitro. *AGROSCRIPT: Journal of Applied Agricultural Sciences*, 8(1), 40-55. <https://doi.org/10.36423/agroscript.v8i1.2615>
- Swilam, E., Saad, M. A., M Morsi, A., & Eisa, M. S. (2024). Evaluation the performance of Rigid Pavement Modified with admixture of Nano Silica and Glass Fiber: A review. *Benha Journal of Applied Sciences*, 9(5), 113-126. <https://doi.org/10.21608/bjas.2024.280651.1403>
- Taheri, E., Shafabakhsh, G., & Sadeghnejad, M. (2026). Comprehensive Assessment of Nano-Silica Modified Asphalt Mixtures: Influence of RAP Content, Aging, and Performance

- Characteristics. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 14(1). <https://doi.org/10.22075/jrce.2025.36705.2259>
- Tuson, H. (2021). Mechanical properties of Escherichia coli cell structure. *Biophysical Journal*, 120(3), 567–576. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2020.11.2275>
- Umami, A., & Wiharyanti, R. (2025). Efektivitas PGPR dan Nanosilika terhadap Pertumbuhan dan Hasil Kedelai Varietas Anjasmoro di Tanah Regosol. *Jurnal Agro Wiralodra*, 8(2), 57-66. <https://doi.org/10.31943/agrowiralodra.v8i2.149>
- Xie, L., Sun, X., Yu, Z., Lian, H., He, H., Wang, L., ... & Xu, X. (2024). Effects of nano-silica on fracture properties and mechanism analysis of basalt fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 439, 137375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137375>
- Zhang, W., & Li, C. (2024). Nano-enhanced concrete: Impact of nano-silica on strength and durability. *Journal of Materials Science*, 59(3), 1123–1135. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00120-9>